



**M** 2014

# **ANÁLISE DO ASSENTAMENTO PERMANENTE DO BALASTRO NO PROCESSO DE DEGRADAÇÃO DE VIAS FÉRREAS**

**DIOGO MIGUEL DA SILVA PIRES RUA CATARINO**  
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA  
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM  
ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

# **ANÁLISE DO ASSENTAMENTO PERMANENTE DO BALASTRO NO PROCESSO DE DEGRADAÇÃO DE VIAS FÉRREAS**

**DIOGO MIGUEL DA SILVA PIRES RUA CATARINO**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA**

---

Orientador: Professora Doutora Cecília Maria Nogueira Alvarenga Santos do Vale

---

Coorientador: Professora Doutora Ana Cristina Carvalhinho Alves Ribeiro

JUNHO DE 2014

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-5081446



[miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-5081440



[feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais

*“A curiosidade é mais importante do que o conhecimento.”*

*Albert Einstein*



## **AGRADECIMENTOS**

Finalizado este trabalho, expresso os meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a sua realização.

- À Professora Cecília Vale, orientadora desta dissertação, pela dedicação, disponibilidade, rigor, motivação e transmissão de conhecimentos durante o desenvolvimento deste trabalho.
- À Professora Cristina Alves Ribeiro, coorientadora desta dissertação, pela disponibilidade e empenho permanentes, por todos os conhecimentos e ensinamentos transmitidos, e por, tão generosamente, me ter facultado os modelos para o estudo realizado.
- A todos os professores do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- À Andreia Meixedo e Cristiana Bonifácio do grupo de investigação de alta velocidade da FEUP, pelos ensinamentos, esclarecimentos e apoio com programa ANSYS.
- Aos meus amigos e colegas de curso que estiveram sempre presentes durante estes 5 anos, pelo apoio, companheirismo e amizade.
- À Lígia, pelo carinho, apoio, incentivo e paciência que sempre transmitiu.
- À minha família, em especial aos meus pais e irmão, por todo o carinho, dedicação e apoio incondicional.



## **RESUMO**

Nesta dissertação analisa-se a influência do modelo de assentamento permanente do balastro na degradação de vias férreas.

Os objetivos principais da dissertação são: conhecer o estado de arte atual sobre modelos de assentamento permanente das camadas granulares de vias férreas balastradas; compreender a modelação da via, do comboio e da interação de contacto roda-carril para o cálculo dinâmico do sistema via-veículo; avaliar numericamente a degradação de uma via balastrada resultante da passagem de tráfego ferroviário, considerando a deformação permanente da camada de balastro através de uma lei que dependa do número de ciclos de carga e do estado de tensão a que os materiais estão sujeitos.

Para concretizar estes objetivos, esta dissertação passou por diversas fases:

- revisão bibliográfica do estado de arte atual sobre: modelos de assentamento permanente das camadas granulares de vias férreas balastradas;
- compreensão da modelação da via, do comboio e da interação de contacto roda-carril para o cálculo dinâmico do sistema via-veículo;
- análise do comportamento estático da via;
- análise do comportamento dinâmico da via a curto prazo;
- estudo paramétrico considerando a lei de deformação permanente da camada de balastro, proposta pela ORE (1970) (comportamento dinâmico da via a longo prazo).

Os resultados obtidos mostram a influência da velocidade de circulação do veículo, da porosidade da camada de balastro, do período inicial de estabilização da camada de balastro e da qualidade geométrica da via – defeito pontual, no comportamento a longo prazo da via, induzido pelo assentamento da camada de balastro.

**PALAVRAS-CHAVE:** assentamento permanente, balastro, via-férrea, modelação, comportamento dinâmico.





## **ABSTRACT**

In this dissertation the influence of the permanent settlement of the ballast in the degradation of railway lines is analyzed.

The main objectives of the dissertation are: to review the current state of the art about models of permanent settlement of granular layers of ballasted railway lines; to understand the modeling of the track, of the train and of the wheel-rail contact for the dynamic calculation of the system; to simulate numerically the deformed track profile evolution that results from the railway traffic by considering the permanent deformation of the material in the numerical model, through a law which depends on the number of loading cycles and the stress state the materials are subjected to.

To achieve these goals, this dissertation had several stages:

- literature review over the current state of the art, about models of permanent settlement of granular layers of ballasted railway tracks;
- understanding of the numerical modeling of the track, the train and the wheel-rail contact for the dynamic analysis of the system;
- analyses of the static behavior of the track;
- analyses of the short term dynamic behavior;
- parametric study considering the law of permanent deformation of ballast layer, proposed by ORE (1970) for the long term dynamic behavior.

The results show the influence of the train speed, the porosity of the ballast layer, the initial stabilization period of the ballast layer in long-term behavior of the track and geometrical track quality – isolated defect, induced by the settlement of the ballast layer.

**KEYWORDS:** permanent settlement, ballast, railway track, modeling, dynamic behavior.



## ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	iii
ABSTRACT .....	v
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. MOTIVAÇÃO .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	1
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	1
<b>2. CONSTITUIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA VIA FÉRREA BALASTRADA .....</b>	<b>3</b>
2.1. INTRODUÇÃO .....	3
2.2. ELEMENTOS CONSTITUINTES DA VIA FÉRREA .....	3
2.3. MODELAÇÃO DINÂMICA DA VIA FÉRREA BALASTRADA .....	6
2.4. SOLICITAÇÕES DA VIA FÉRREA .....	9
2.5. A PRESENÇA DE DEFEITOS NA VIA FÉRREA BALASTRADA .....	9
2.6. COMPORTAMENTO A LONGO PRAZO DA VIA FÉRREA BALASTRADA .....	10
2.7. CONCLUSÕES .....	17
<b>3. MODELAÇÃO DINÂMICA DO SISTEMA VIA-VEÍCULO .....</b>	<b>19</b>
3.1. INTRODUÇÃO .....	19
3.2. DESCRIÇÃO DA VIA FÉRREA BALASTRADA .....	19
3.3. MODELAÇÃO DO VEÍCULO E DA INTERAÇÃO VEÍCULO-VIA .....	24
3.3.1. MODELAÇÃO DO VEÍCULO .....	24
3.3.2. MODELAÇÃO DO CONTACTO E DA INTERAÇÃO VIA-VEÍCULO .....	26
3.4. MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO A LONGO PRAZO DA VIA .....	28
3.5. CONCLUSÕES .....	30
<b>4. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA VIA BALASTRADA PERFEITA .....</b>	<b>31</b>
4.1. INTRODUÇÃO .....	31
4.2. COMPORTAMENTO ESTÁTICO DA VIA .....	32
4.3. COMPORTAMENTO DINÂMICO A CURTO PRAZO DA VIA PERFEITA .....	36
4.4. COMPORTAMENTO DINÂMICO A LONGO PRAZO DA VIA PERFEITA .....	43

4.4.1. CASO BASE .....	43
4.4.1.1. Nível de tensão e deformação.....	43
4.4.1.2. Resultados da análise dinâmica.....	45
4.4.2. INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CIRCULAÇÃO DO VEÍCULO .....	50
4.4.2.1. Nível de tensão e deformação da via .....	50
4.4.2.2. Resultados da análise dinâmica.....	52
4.4.3. INFLUÊNCIA DA POROSIDADE DA CAMADA DE BALASTRO .....	55
4.4.3.1. Nível de tensão e deformação.....	55
4.4.3.2. Resultados da análise dinâmica.....	56
4.4.4. INFLUÊNCIA DO PERÍODO INICIAL DE ESTABILIZAÇÃO DA CAMADA DE BALASTRO .....	60
4.4.4.1. Nível de tensão e deformação da via .....	60
4.4.4.2. Resultados da análise dinâmica.....	61
4.5. CONCLUSÕES .....	65
<b>5. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA VIA BALASTRADA COM DEFEITO PONTUAL .....</b>	<b>71</b>
5.1. INTRODUÇÃO .....	71
5.1. COMPORTAMENTO DINÂMICO A CURTO PRAZO DA VIA COM DEFEITO PONTUAL .....	71
5.2. COMPORTAMENTO DINÂMICO A LONGO PRAZO DA VIA COM DEFEITO PONTUAL.....	76
5.2.1. Nível de tensão e deformação.....	76
5.2.2. Resultados da análise dinâmica.....	78
5.3. CONCLUSÕES .....	83
<b>6. CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTO PARA INVESTIGAÇÃO FUTURA .....</b>	<b>85</b>
6.1. CONCLUSÕES .....	85
6.2. PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTOS PARA INVESTIGAÇÃO FUTURA .....	86

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Esquema da estrutura longitudinal da via balastrada (Selig e Waters 1994, adaptado de Fortunato 2005) .....	4
Fig. 2.2 – Modelos bidimensionais de via férrea (Vale 2010) .....	7
Fig. 2.3 – Modelo de via balastrada com continuidade longitudinal das camadas da via .....	8
Fig. 2.4 – Esquema de modelação da palmilha pelo modelo de Kelvin .....	9
Fig. 2.5 – Forma e expressão analítica para definir defeito pontual da via .....	10
Fig. 3.1 - Representação esquemática do perfil longitudinal da via (adaptado de Alves Ribeiro 2012) .....	20
Fig. 3.2 – Representação esquemática do modelo bidimensional calibrado (Alves Ribeiro 2012) .....	22
Fig. 3.3 – Pormenor da colocação de um elemento amortecedor na fronteira do modelo (Alves Ribeiro 2012) .....	22
Fig. 3.4 – Pormenor condições de apoio da estrutura (fronteira inferior) .....	23
Fig. 3.5 – Modelo bidimensional em estado plano de tensão .....	24
Fig. 3.6 – Modelos elementares em 2D de meio eixo do veículo (Vale 2010) .....	25
Fig. 3.7 - Modelo elementar em 2D de um eixo do veículo .....	25
Fig. 3.8 – Comboio <i>Eurostar</i> .....	26
Fig. 3.9 – Pormenor da modelação do contacto massa suspensa-viga (adaptado de Alves Ribeiro (2012)) .....	27
Fig. 3.10 – Representação esquemática do processo de simulação da deformação permanente da via (Alves Ribeiro 2012) .....	28
Fig. 4.1 – Deslocamento vertical do carril para a carga aplicada sobre uma travessa .....	32
Fig. 4.2 – Distribuição do deslocamento vertical pelos constituintes deformáveis da via: (a) carga aplicada sobre uma travessa e (b) carga aplicada entre travessas.....	33
Fig. 4.3 – Distribuição da carga pelas travessas adjacentes ao ponto de aplicação. Carga sobre uma travessa .....	33
Fig. 4.4 – Distribuição da carga pelas travessas adjacentes ao ponto de aplicação. Carga entre travessas .....	33
Fig. 4.5 – Representação de um corte da malha de elementos finitos .....	34
Fig. 4.6 – Força de interação roda-carril para a velocidade de 300 km/h ( $E=80$ MPa) .....	37
Fig. 4.7 – Deslocamento vertical da via e posição da roda para a velocidade de 300 km/h ( $E=80$ MPa) .....	37
Fig. 4.8 – Tensão vertical na camada de balastro para a velocidade de 300 km/h ( $E=80$ MPa) .....	38
Fig. 4.9 - Tensão vertical na camada de sub-balastro para a velocidade de 300 km/h ( $E=80$ MPa) ...	38
Fig. 4.10 - Tensão vertical na camada de fundação para a velocidade de 300 km/h ( $E=80$ MPa) .....	39

Fig. 4.11 – Variação da força de interação roda-carril para a velocidade de 100 e 350 km/h (E=300 MPa) .....	40
Fig. 4.12 - Posição vertical da roda ao longo da via para velocidade de 100 km/h e 350 km/h (E=300 MPa) .....	41
Fig. 4.13 – Evolução da tensão de desvio ao longo da via na camada de balastro, em função do número de ciclos de carga .....	44
Fig. 4.14 – Evolução da tensão de desvio na camada de balastro no alinhamento vertical de uma travessa, em função do número de ciclos de carga.....	44
Fig. 4.15 – Evolução da deformação permanente no topo da camada de balastro, em função do número de ciclos de carga .....	45
Fig. 4.16 – Assentamento no topo da camada de balastro ao longo da via, em função do número de ciclos de carga.....	46
Fig. 4.17 – Evolução do assentamento no topo da camada de balastro e na base de uma travessa, em função do número de ciclos de carga .....	46
Fig. 4.18 - Evolução do valor máximo da força de interação travessa-balastro, em função do número de ciclos de carga .....	47
Fig. 4.19 – Posição vertical da roda, ao longo da via, em função do número de ciclos de carga .....	47
Fig. 4.20 – Evolução do deslocamento vertical da via, em função do número de ciclos de carga .....	48
Fig. 4.21 – Evolução dos valores máximo e mínimo da força de interação roda-carril, em função do número de ciclos de carga .....	48
Fig. 4.22 – Registo temporal da aceleração vertical de uma travessa para diferentes ciclos de carregamento .....	49
Fig. 4.23 - Aceleração vertical de uma travessa, em função do número de ciclos de carga .....	50
Fig. 4.24 – Evolução da tensão de desvio na camada de balastro para a velocidade de circulação de 300 km/h e de 200 km/h, em função do número de ciclos de carga .....	51
Fig. 4.25 – Evolução da deformação permanente da camada de balastro para a velocidade de circulação de 300 km/h e de 200 km/h, em função do número de ciclos de carga .....	51
Fig. 4.26 – Evolução do assentamento da camada de balastro para a velocidade de circulação de 300 km/h e de 200 km/h, em função do número de ciclos de carga .....	52
Fig. 4.27 – Evolução do assentamento na base de uma travessa e no topo da camada de balastro para a velocidade de 200 km/h, em função do número de ciclos de carga.....	52
Fig. 4.28 – Evolução da força de interação travessa-balastro para a velocidade de circulação de 300 km/h e de 200 km/h, em função do número de ciclos de carga .....	53
Fig. 4.29 – Evolução do deslocamento vertical da via para a velocidade de circulação de 300 km/h e de 200 km/h, em função do número de ciclos de carga deslocamento.....	53
Fig. 4.30 – Evolução da força de interação roda-carril para a velocidade de circulação de 300 km/h e de 200 km/h, em função do número de ciclos de carga .....	54
Fig. 4.31 – Evolução da aceleração vertical de uma travessa para a velocidade de circulação de 300 km/h e de 200 km/h, em função do número de ciclos de carga .....	54

Fig. 4.32 – Evolução da tensão de desvio na camada de balastro para a porosidade de 0,40 e 0,42, em função do número de ciclos de carga .....	55
Fig. 4.33 – Evolução da deformação permanente da camada de balastro para a porosidade de 0,40 e 0,42, em função do número de ciclos de carga .....	56
Fig. 4.34 – Evolução do assentamento permanente da camada de balastro para a porosidade de 0,40 e 0,42, em função do número de ciclos de carga .....	56
Fig. 4.35 – Evolução do assentamento na base de uma travessa e no topo da camada de balastro para a porosidade de 0,40 e de 0,42, em função do número de ciclos de carga .....	57
Fig. 4.36 – Evolução da força de interação travessa-balastro para a porosidade de 0,40 e de 0,42, em função do número de ciclos de carga .....	58
Fig. 4.37 – Evolução do deslocamento vertical da via para a porosidade de 0,40 e de 0,42, em função do número de ciclos de carga .....	58
Fig. 4.38 – Evolução da força de interação roda-carril para a porosidade de 0,40 e de 0,42, em função do número de ciclos de carga .....	59
Fig. 4.39 – Evolução da aceleração vertical de uma travessa para a porosidade de 0,40 e de 0,42, em função do número de ciclos de carga .....	59
Fig. 4.40 – Evolução da tensão de desvio na camada de balastro para o período inicial de estabilização da camada de balastro equivalente a 100000 ciclos e a 50000 ciclos, em função do número de ciclos de carga .....	60
Fig. 4.41 – Evolução da deformação permanente da camada de balastro para o período inicial de estabilização da camada de balastro equivalente a 100000 ciclos e a 50000 ciclos, em função do número de ciclos de carga .....	61
Fig. 4.42 – Evolução do assentamento permanente da camada de balastro para o período inicial de estabilização da camada de balastro equivalente a 100000 e a 50000 ciclos, em função do número de ciclos de carga.....	61
Fig. 4.43 – Evolução do assentamento na base de uma travessa e no topo da camada de balastro para o período inicial de estabilização da camada de balastro equivalente a 50000 ciclos, em função do número de ciclos de carga .....	62
Fig. 4.44 – Evolução da força de interação travessa-balastro para o período inicial de estabilização da camada de balastro equivalente a 100000 e a 50000 ciclos, em função do número de ciclos de carga .....	63
Fig. 4.45 – Evolução do deslocamento vertical da via considerando o período inicial de estabilização da camada de balastro equivalente a 100000 e a 50000 ciclos, em função do número de ciclos de carga.....	63
Fig. 4.46 – Evolução da força de interação roda-carril para o período inicial de estabilização da camada de balastro equivalente a 100000 e a 50000 ciclos, em função do número de ciclos de carga .....	64
Fig. 4.47 – Evolução da aceleração vertical de uma travessa para o período inicial de estabilização da camada de balastro equivalente a 100000 e a 50000 ciclos, em função do número de ciclos de carga .....	65



Fig. 4.48 - Evolução da tensão de desvio na camada de balastro no alinhamento vertical de uma travessa, em função do número de ciclos de carga.....	68
Fig. 4.49 - Evolução do assentamento permanente no topo da camada de balastro no alinhamento vertical de uma travessa, em função do número de ciclos de carga .....	68
Fig. 4.50 – Evolução do deslocamento vertical da via, em função do número de ciclos de carga .....	69
Fig. 4.51 - Evolução da força máxima de interação travessa-balastro, em função do número de ciclos de carga.....	69
Fig. 4.52 – Evolução da força de interação roda-carril, em função do número de ciclos de carga.....	70
Fig. 4.53 - Evolução da aceleração vertical de uma travessa, em função do número de ciclos de carga .....	70
Fig. 5.1 – Geometria e expressão analítica de defeito pontual da via ( $A= 8 \text{ mm}$ ; $k= 0,45$ ).....	72
Fig. 5.2 – Força de interação roda-carril ao longo da via .....	72
Fig. 5.3 - Posição vertical da roda ao longo da via .....	73
Fig. 5.4 – Deslocamento vertical do carril no alinhamento de uma travessa .....	73
Fig. 5.5 – Tensão vertical na camada de balastro para a via com defeito pontual.....	74
Fig. 5.6 – Tensão vertical na camada de sub-balastro .....	74
Fig. 5.7 – Tensão vertical na camada de fundação .....	75
Fig. 5.8 – Evolução da tensão de desvio ao longo da via na camada de balastro em função do número de ciclos de carga .....	76
Fig. 5.9 – Evolução da tensão de desvio na camada de balastro no alinhamento vertical de uma travessa em função do número de ciclos de carga.....	77
Fig. 5.10 – Evolução da deformação permanente da camada de balastro em função do número de ciclos de carga (travessa localizada no alinhamento vertical de amplitude máxima do defeito).....	77
Fig. 5.11 – Assentamento no topo da camada de balastro ao longo da via para cada ciclo de carga	78
Fig. 5.12 - Evolução do assentamento da camada de balastro em função do número de ciclos de carga.....	78
Fig. 5.13 – Evolução do assentamento na base de uma travessa e no topo da camada de balastro em função do número de ciclos de carga .....	79
Fig. 5.14 - Assentamento na base das travessas e no topo da camada de balastro ao fim de 1 milhão de ciclos de carga, ao longo da via .....	80
Fig. 5.15 – Evolução da força de interação travessa-balastro para diferentes ciclos de carregamento .....	80
Fig. 5.16 – Evolução da força de interação travessa-balastro em função do número de ciclos de carga .....	81
Fig. 5.17 – Posição vertical da roda ao longo da via em função do número de ciclos de carga .....	81
Fig. 5.18 – Evolução do deslocamento vertical da via em função do número de ciclos de carga .....	82

Fig. 5.19 – Registo temporal da aceleração vertical de uma travessa para diferentes ciclos de carregamento .....	82
Fig. 5.20 – Evolução da aceleração vertical de uma travessa em função do número de ciclos de carga .....	83



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Leis de assentamento permanente para o balastro.....	12
Quadro 2.2 – Leis de deformação permanente para o balastro .....	16
Quadro 3.1 – Características geométricas da via .....	20
Quadro 3.2 – Características mecânicas do carril UIC60 (Alves Ribeiro 2012) .....	20
Quadro 3.3 – Características mecânicas adotadas para as camadas da via.....	21
Quadro 4.1 - Evolução das tensões em profundidade para carga aplicada sobre uma travessa .....	34
Quadro 4.2 - Evolução das tensões em profundidade para carga aplicada entre travessas .....	35
Quadro 4.3 - Evolução das tensões principais e de desvio em profundidade para carga aplicada sobre uma travessa .....	36
Quadro 4.4 - Evolução das tensões principais e de desvio em profundidade para carga aplicada entre travessas .....	36
Quadro 4.5 – Força de interação roda-carril para diferentes velocidades de circulação (E=300 MPa) 39	
Quadro 4.6 - Frequência de excitação para diferentes velocidades de circulação (E=300 MPa) .....	40
Quadro 4.7 - Deslocamento vertical dinâmico máximo e mínimo da via para as diferentes velocidades de circulação (E=300 MPa).....	41
Quadro 4.8 – Tensão vertical nas camadas da via para as várias velocidades de circulação (E=300 MPa) .....	42
Quadro 4.9 – Variação da tensão vertical entre a velocidade de 100 km/h e 350 km/h (E=300 MPa) 42	
Quadro 5.1 – Tensão vertical nas camadas da via.....	75



## SÍMBOLOS

### CAPÍTULO 2

#### Notações latinas

$a$  – parâmetro associado à Lei de Indraratna e Nimbalkar (2013)

$A$  – valor máximo do defeito pontual (amplitude) [m]

$b$  – parâmetro associado à Lei de: Indraratna e Nimbalkar (2013); e Selig e Waters (1994).

$c$  – parâmetro associado à Lei de: Raymond et al. (1975); Hetler (1984); Mauer (1995); Hunt (1986); Indraratna et al. (2011); ORE (1970); Shenton (1978); Hettler (1987); Alva-Hurtado e Selig (1981); Alves Ribeiro (2012)

$c_p$  – amortecimento da palmilha [N.s/m]

$d$  – parâmetro associado à Lei de Indraratna et al. (2011)

$e$  – espaçamento entre apoios (travessas) [m]

$e$  – parâmetro associado à Lei de Neidhart (2001)

$E(T)$  – assentamento permanente da via após a passagem de T toneladas acumuladas, Lei de ORE (1988) [m]

$E_0$  – perfil inicial da via, Lei de ORE (1988)

$E_b$  – módulo de deformabilidade da camada de balastro [Pa]

$E_f$  – módulo de deformabilidade da camada de fundação [Pa]

$E_{sb}$  – módulo de deformabilidade da camada de sub-balastro [Pa]

$f$  – frequência [Hz]

$f$  – parâmetro associado à Lei de Neidhart (2001)

$fn$  – parâmetro associado à Lei de Pappin (1979), fator de forma baseado no número de ciclos de carga

$F_{din}$  – carga dinâmica [N]

$g$  – parâmetro associado à Lei de Jeffs e Marich (1987)

$h$  – parâmetro associado à Lei de Jeffs e Marich (1987)

$H_b$  – espessura da camada de balastro [m]

$H_f$  – espessura da camada de fundação [m]

$H_{sb}$  – espessura da camada de sub-balastro [m]

$i$  – parâmetro associado à Lei de Jeffs e Marich (1987)

$j$  – parâmetro associado à Lei de Jeffs e Marich (1987)

$k$  – parâmetro associado à Lei de Jeffs e Marich (1987), Thom (2006)

$k_p$  – rigidez da palmilha [N/m]

$\bar{k}$  – parâmetro que caracteriza a extensão do defeito pontual [adm]

$k_1$  – parâmetro associado à Lei de Shenton (1978)

$k_2$  – parâmetro associado à Lei de Shenton (1978)

$L$  – parâmetro associado à Lei de Sato (1995)

$L$  – comprimento da trajetória de tensão, Lei Pappin (1979)

$m$  – massa da travessa [kg]

$M$  – parâmetro associado à Lei de Sato (1995)

$M_1$  – parâmetro associado à Lei de Thom (1988)

$n_p$  – porosidade da camada de balastro

$N$  – número de ciclos de carga

$N_i$  – número de ciclos de carga da primeira fase

$p^0$  – tensão média efetiva modificada, Lei de Pappin (1979)

$P$  – parâmetro associado à Lei de Sato (1995)

$q^0$  – tensão de desvio modificada, Lei de Pappin (1979)

$q_f$  – tensão de desvio, Lei de Thom (1988)

$q_{máx}$  – tensão de desvio máxima, Lei de Thom (1988)

$Q$  – parâmetro associado à Lei de Shenton (1978)

$s$  – parâmetro associado à Lei de: Raymond et al. (1975); Hetler (1984); Mauer (1995); Hunt (1986); Bruni et al. (2002) [ $mm/kN^{1,6}$  ]

$S_N$  – assentamento da via, após  $N$  ciclos de carga [m]

$S_{opt}$  – assentamento da via, nível médio

$S_{méd}$  – assentamento da via, nível otimista

$S_{pess}$  – assentamento da via, nível pessimista

$S_1$  – assentamento permanente no primeiro ciclo de carregamento [m]

$t$  – parâmetro associado à Lei de Kennedy et al. (2013)

$T$  – número de toneladas acumuladas, Lei de ORE (1988)

$V$  – velocidade de circulação do comboio [km/h]

$x_p$  – deslocamento da palmilha, em compressão [m]

$y$  – parâmetro associado à Lei de Bruni et al. (2002), Indraratna et al. (2007)

#### Notações gregas

$\alpha$  – parâmetro associado à Lei de: ORE (1988), Sato (1995), Guérin (1996), Shenton (1978)

$\beta$  – parâmetro associado à Lei de: ORE (1988), Sato (1995), Guérin (1996), Shenton (1978)

$\gamma$  – parâmetro associado à Lei de Sato (1995)

$\varepsilon_N$  – deformação permanente do balastro após  $N$  ciclos de cargas

$\varepsilon_1$  – deformação permanente no primeiro ciclo de carga

$\nu_b$  – coeficiente de Poisson da camada de balastro [adm]  
 $\nu_{sb}$  – coeficiente de Poisson da camada de sub-balastro [adm]  
 $\nu_f$  – coeficiente de Poisson da camada de fundação [adm]  
 $\rho_b$  – densidade da camada de balastro [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $\rho_{sb}$  – densidade da camada de sub-balastro [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $\rho_f$  – densidade da camada de fundação [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $\sigma$  – parâmetro associado à Lei de Thom (2006)  
 $\sigma_s$  – tensão média associada à Lei de Thom (1988)  
 $\sigma_t$  – tensão de corte associada à Lei de Thom (1988)  
 $\sigma_1$  – tensão principal máxima (Pa)  
 $\sigma_3$  – tensão principal mínima (Pa)

### CAPÍTULO 3

#### *Notações latinas*

$A$  – área [ $\text{m}^2$ ]  
 $c$  – amortecimento da palmilha [ $\text{N.s/m}$ ]  
 $c_1$  – amortecimento da suspensão primária [ $\text{N.s/m}$ ]  
 $c_2$  – amortecimento da suspensão secundária [ $\text{N.s/m}$ ]  
 $C_H$  – rigidez do contacto hertziano [ $\text{N/m}$ ]  
 $E$  – módulo de deformabilidade [Pa]  
 $F$  – carga de linearização [kN]  
 $I$  – inércia [ $\text{m}^4$ ]  
 $G$  – módulo de distorção do material [GPa]  
 $k_H$  – rigidez de contacto roda-carril [ $\text{N/m}$ ]  
 $k_1$  – rigidez da suspensão primária [ $\text{N/m}$ ]  
 $k_2$  – rigidez da suspensão secundária [ $\text{N/m}$ ]  
 $M$  – massa do conjunto eixo-roda [kg]  
 $M_b$  – massa do bogie [kg]  
 $M_c$  – massa da caixa [kg]  
 $P$  – carga por eixo [kN]  
 $\bar{r}$  – ordenada do perfil de irregularidades do carril  
 $V_s$  – velocidades de propagação das ondas  $S$  no meio [m/s]  
 $x$  – deslocamento vertical da roda [m]



$y$  – deslocamento do carril [m]

$z_b$  – deslocamento vertical do bogie [m]

$z_c$  – deslocamento vertical da caixa [m]

$z_r$  – deslocamento vertical da roda [m]

*Notações gregas*

$\Delta N$  – incrementos de ciclos de carga [adm]

$\nu$  – coeficiente de Poisson [adm]

$\rho$  – densidade [kg/m<sup>3</sup>]

$\delta$  – deslocamento relativo entre a roda e o carril [m]

## CAPÍTULO 4

*Notações latinas*

$e$  – espaçamento entre apoios (travessas) [m]

$E$  – módulo de deformabilidade [MPa]

$f$  – frequência [Hz]

$N$  – número de ciclos de carga

$N_i$  – número de ciclos de carga da primeira fase

$V$  – velocidade de circulação do comboio [km/h]

*Notações gregas*

$\sigma_y$  – tensão vertical [kPa]

$\sigma_x$  – tensão horizontal [kPa]

$\tau_{xy}$  – tensão tangencial [kPa]

$\sigma_1$  – tensão principal máxima

$\sigma_3$  – tensão principal mínima

## CAPÍTULO 5

*Notações latinas*

$A$  – valor de pico do defeito pontual [m]

$\bar{k}$  – parâmetro (caracteriza a extensão do defeito pontual)

$N$  – número de ciclos de carga

$z$  – perfil de irregularidade do carril [m]

*Notações gregas*

$\sigma_y$  – tensão vertical [kPa]

## **ACRÓNIMOS E SIGLAS**

ANSYS – *software* de simulação em elementos finitos

BLS – Barra Longa Soldada

ETI – Especificação Técnica de Interoperabilidade

FIB – *Fédération International du Béton*

MATLAB – *software* de cálculo numérico

ORE – *Office for Research and Experiments of the International Union of Railways*

## **ABREVIATURAS**

adm – adimensional



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. MOTIVAÇÃO

Começa por referir-se, a importância do transporte ferroviário de alta velocidade, que tem tido um elevado crescimento nas últimas décadas e que se espera um crescimento exponencial nos próximos anos, devido principalmente à segurança, comodidade e rapidez que proporciona.

A motivação para o desenvolvimento desta dissertação prende-se sobretudo com a necessidade de um maior conhecimento sobre o comportamento dinâmico da via férrea balastrada bem como o conhecimento de técnicas que permitam efetuar a previsão da evolução do assentamento permanente das camadas granulares. Trata-se de um assunto relevante dado que esta previsão pode constituir um importante auxílio, para os Gestores Ferroviários, no planeamento das ações de manutenção da via.

### 1.2. OBJETIVOS

Os objetivos principais desta dissertação são: conhecer o estado de arte atual sobre modelos de assentamento permanente das camadas granulares de vias férreas balastradas; compreender a modelação da via, do comboio e do contacto roda-carril para o cálculo dinâmico do sistema via-veículo; avaliar numericamente a degradação de uma via balastrada, considerando no modelo numérico a deformação permanente dos materiais dada por uma lei que dependa do número de ciclos de carga e do estado de tensão a que os materiais estão sujeitos. A lei de deformação permanente da camada de balastro adotada neste estudo consiste na lei proposta pela ORE (1970). Com o estudo numérico desenvolvido pretende-se estudar a influência dos parâmetros da lei de deformação no assentamento permanente.

### 1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, apresentando-se, neste primeiro, a motivação pela escolha deste tema, os principais objetivos a serem desenvolvidos, assim como a forma como a tese se encontra organizada.

No segundo capítulo é apresentada a constituição e caracterização da via férrea balastrada, com especial relevância para os elementos constituintes destas vias e para o estado de arte atual sobre a modelação da via e dos seus elementos, dos modelos de assentamento permanente das camadas da via e uma breve referência ao comportamento dinâmico e a longo prazo destas vias.

O terceiro capítulo aborda a modelação dinâmica do sistema via-veículo, sendo este dedicado à apresentação da modelação (da via, do veículo, da interação veículo-via e do comportamento a longo prazo) utilizada nos capítulos seguintes.

O quarto capítulo corresponde à avaliação do comportamento da via balastrada perfeita. É estudado o comportamento estático da via e o comportamento dinâmico da via a curto prazo e a longo prazo. Para a análise do comportamento da via a longo prazo realizou-se um estudo paramétrico, onde são tidos em conta a velocidade de circulação do veículo e a influência de alguns parâmetros do modelo de assentamento permanente da via.

O quinto capítulo corresponde à avaliação do comportamento da via balastrada com defeito pontual. É estudado o comportamento dinâmico da via a curto e a longo prazo.

No sexto capítulo, são apresentadas as principais conclusões deste estudo, assim como, algumas perspectivas de desenvolvimento para investigações futuras.

# 2

## CONSTITUIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA VIA FÉRREA BALASTRADA

### 2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, descreve-se a constituição da via férrea balastrada, assim como a forma como a esta pode ser modelada numericamente, referindo-se alguns aspetos sobre o seu comportamento dinâmico a curto e a longo prazo. Faz-se ainda uma breve referência à presença de defeitos na via férrea balastrada.

Na secção 2.2, apresenta-se a via balastrada, fazendo-se descrição de cada elemento constituinte da via: carris, travessas, sistema de fixação carril-travessa, palmilhas, camada de balastro, camada de sub-balastro e fundação da via.

Na secção 2.3, refere-se, sumariamente, os modelos numéricos vulgarmente usados na modelação da via férrea balastrada.

Na secção 2.4, aborda-se o solicitação dinâmica da via férrea, referindo-se fontes de excitação dinâmica sobre a via.

Na secção 2.5, faz-se uma breve referência aos vários defeitos na via férrea balastrada, podendo estes ser pontuais ou distribuídos e indica-se a forma geométrica e a expressão analítica para definir o defeito pontual considerado neste estudo.

Na secção 2.6, indicam-se metodologias para a modelação do comportamento a longo prazo da via, encontradas na bibliografia.

### 2.2. ELEMENTOS CONSTITUINTES DA VIA FÉRREA

Na Fig. 2.1, apresenta-se um esquema estrutural da via balastrada e os respetivos elementos que a constituem.

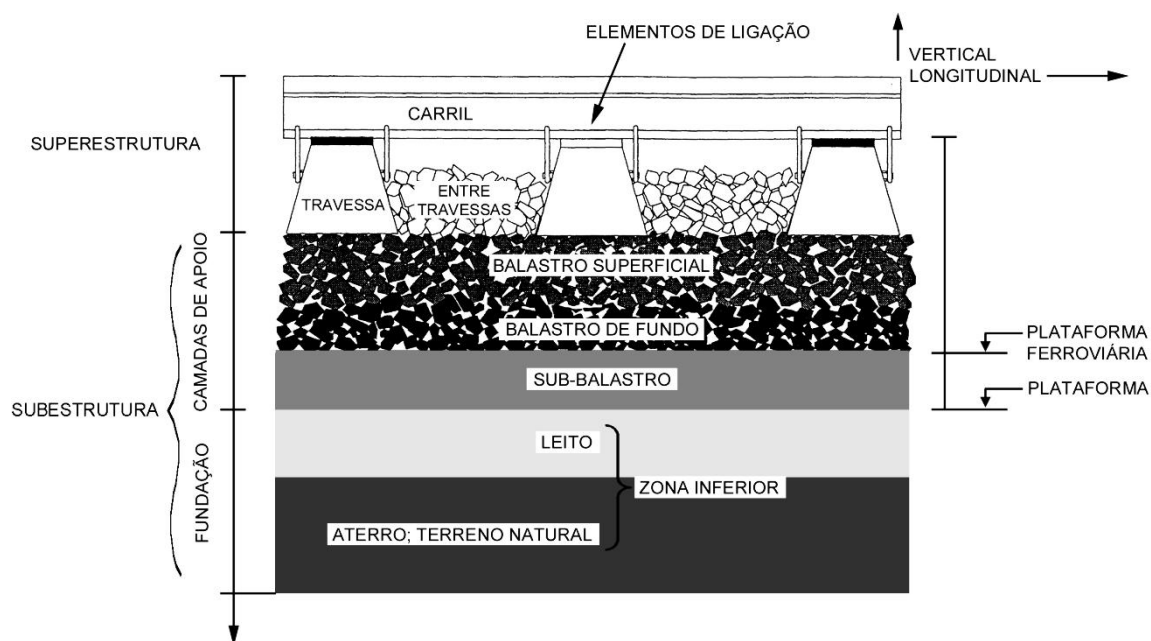


Fig. 2.1 – Esquema da estrutura longitudinal da via balastrada (Selig e Waters 1994, adaptado de Fortunato 2005)

Os elementos constituintes da via podem ser divididos em duas categorias: a superestrutura, constituída pelos carris, o sistema de fixação carril-travessa, e as travessas; e a subestrutura, constituída pelo balastro, pelo sub-balastro, e fundação (leito de via e aterro ou terreno natural).

Os elementos da superestrutura e o balastro são elementos de desgaste mais ou menos elevado, devido à passagem do tráfego ferroviário. O sub-balastro e a plataforma têm, por norma, uma duração mais elevada, que pode ser da ordem de 50 a 100 anos (Fortunato 2005).

A via balastrada é uma solução estrutural que, pelas suas características, tem um bom comportamento dinâmico relativamente aos esforços provocados pela circulação do tráfego ferroviário.

## CARRIS

Os carris são elementos estruturais em aço que têm como funções suportar e transmitir, para as travessas, as cargas que recebem das rodas, distribuir as forças originadas no arranque e frenagem na aderência roda-carril e, principalmente, impor a direção a ser seguida pelas rodas dos comboios. Funcionam como vigas apoiadas com determinado afastamento e que por isso têm de ter rigidez suficiente para transferir as cargas concentradas transmitidas pelas rodas do comboio sem sofrerem flexão excessiva (Fortunato 2005).

Nas linhas de alta velocidade, atualmente, instalam-se carris do tipo UIC60 sem juntas entre si, formando assim barras longas soldadas (BLS). Este tipo de carris tem a vantagem de atenuar a velocidade de deterioração da via uma vez que reduz uma parcela dos efeitos dinâmicos associados à existência de juntas (Paixão e Fortunato 2009).

## TRAVESSAS

As travessas são elementos assentes pontualmente sobre o balastro, localizando-se entre este e o carril. Têm como funções atenuar e distribuir as cargas dos carris para o balastro com níveis de tensão aceitáveis, suportar o sistema de fixação dos carris e impedir movimentos verticais, laterais e longitudinais dos carris (Fortunato 2005). Para vias balastradas, o espaçamento entre travessas é habitualmente de 0,60 m em plena via (Vale 2010). Tradicionalmente as travessas são de madeira ou de betão armado pré-esforçado. Em linhas de alta velocidade, instalam-se travessas de grande resistência do tipo monobloco, de betão armado pré-esforçado, uma vez que estas são em grande parte responsáveis pela preservação da bitola e da inclinação do carril (Paixão e Fortunato 2009).

## SISTEMA DE FIXAÇÃO CARRIL-TRAVERSA

O sistema de fixação transmite as forças aplicadas sobre os carris às travessas e os esforços produzidos pelas variações de temperatura dos carris, assegurando o correto posicionamento dos carris sobre as travessas (Fortunato 2005). Estes sistemas podem ser do tipo direto ou indireto. Nos sistemas diretos o carril e a palmilha são fixados diretamente à travessa por um único sistema de fixação, enquanto nos sistemas indiretos, existe uma fixação para ligar o carril à palmilha e outro para ligar a palmilha à travessa (FIB 2006).

## PALMILHAS

As palmilhas são elementos elásticos incorporados no sistema de fixação carril-travessa que têm como função promover um adequado apoio ao carril, diminuir o atrito carril-travessa, amortecer as vibrações induzidas pelas rodas e promover o isolamento elétrico dos carris (Vale 2010).

Relativamente à rigidez destes elementos, a ETI (2008), indica que em plena via a rigidez dinâmica da palmilha não deve exceder 600 MN/m, para as fixações de travessa em betão.

## CAMADA DE BALASTRO

A camada de balastro desempenha um importante papel no comportamento da via, dado que resiste a forças verticais devido à resistência direta das suas partículas. Note-se que as forças laterais e longitudinais são equilibradas devido ao atrito entre o balastro e as travessas, e ao embricamento das partículas de balastro (Fortunato 2005).

É usual considerar-se, para este elemento da via, uma camada com a espessura corrente entre 20 a 40 cm, cuja interação entre partículas granulares grosseiras proporciona uma elevada resistência à compressão.

A camada de balastro serve ainda de apoio às travessas, recebendo, por isso, elevadas cargas transmitidas por elas. Mais, este elemento tem como funções reduzir as tensões transmitidas às camadas inferiores, contribuir para a drenagem da via, dado que permite a percolação da água por entre as partículas, atenuar as vibrações resultantes da passagem de comboios e facilitar a realização de ações de correções de nivelamento e de alinhamento da via (Paixão e Fortunato 2009).



#### CAMADA DE SUB-BALASTRO

A camada de sub-balastro faz a transição entre a camada de balastro e a fundação. Em linhas modernas de alta velocidade, é normalmente composta por material britado de granulometria extensa, apresentando uma espessura de cerca de 30 cm (Paixão e Fortunato 2009).

A camada de sub-balastro tem como principais funções: reduzir o estado de tensão na fundação para níveis aceitáveis, proteger a fundação, promover a separação entre o balastro e a fundação, evitando assim a interpenetração e a migração do material fino, evitar o desgaste da fundação pela ação mecânica do balastro, principalmente na presença de água, que pode provocar a formação de lamas, as quais, por ação das cargas dinâmicas, podem ser bombadas para a superfície e funcionar como elemento drenante e filtrante, da plataforma, evitando que haja passagem de elementos finos para o balastro (Fortunato 2005).

#### FUNDAÇÃO DA VIA

A fundação da via corresponde à camada de solo onde se apoia o sub-balastro e estende-se em profundidade até onde se fazem sentir de forma significativa as solicitações do tráfego ferroviário. Por norma, a fundação é constituída por duas zonas, o leito de via, mais superficial (constitui o elemento de proteção das terraplenagens) e a fundação em geral, mais profunda.

As principais funções da fundação são: servir de apoio à superestrutura e às camadas de apoio da via, sem atingir a rotura nem deformações excessivas, quer reversíveis, quer permanentes; resistir ao atrito e ao desgaste causados pelo balastro e (ou) sub-balastro, fenómenos que tendem a causar a bombagem de finos e consequentes assentamentos; constituir uma adequada superfície para uma correta compactação do sub-balastro (Fortunato 2005).

### **2.3. MODELAÇÃO DINÂMICA DA VIA FÉRREA BALASTRADA**

O comportamento dinâmico da via férrea balastrada pode ser simulado recorrendo a modelos numéricos, sendo a escolha do modelo função do tipo de estudo realizado. É possível modelar a via recorrendo a modelos bidimensionais (2D) ou tridimensionais (3D), uma vez que no âmbito desta dissertação será utilizado um modelo bidimensional, não serão apresentados os modelos tridimensionais.

O modelo mais simples considera apenas o carril como uma viga em apoio elástico (apoio contínuo), Fig. 2.2 a). Este modelo considera o carril apoiado sobre molas com rigidez equivalente de todos os elementos que servem de apoio ao carril.

Os modelos de elementos finitos bidimensionais onde se considera o carril apoiado de modo discreto podem ser mais ou menos completos. Num dos modelos mais simples usualmente adotado, esquematizado na Fig. 2.2 b), considera-se o carril modelado com elementos de viga, apoiado discretamente em conjuntos de molas e amortecedores que simulam os diferentes elementos da via (palmilha, balastro, sub-balastro e fundação). Ainda neste modelo, usam-se massas concentradas para simular as travessas. Uma vez que neste modelo não se tem em conta a continuidade longitudinal das camadas granulares da via, podem-se considerar elementos de barra, Fig. 2.2 c), ou elementos de barra e massa pontual, Fig. 2.2 d), definindo-se assim a continuidade por molas e amortecedores na direção longitudinal.

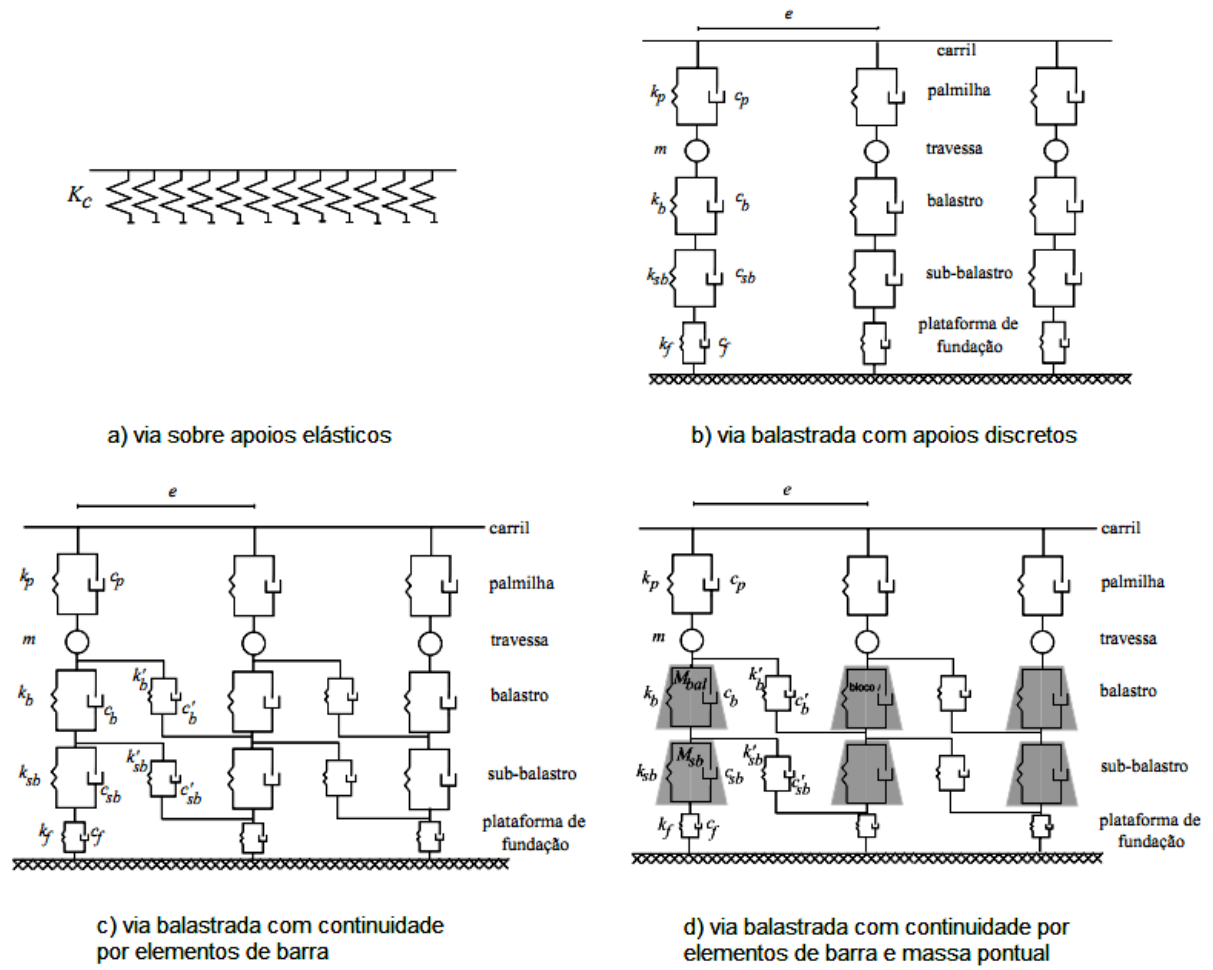


Fig. 2.2 – Modelos bidimensionais de via férrea (Vale 2010)

Outra forma de considerar a continuidade longitudinal das camadas granulares da via consiste em modelar estas camadas através de elementos finitos em estado plano de tensão. A Fig. 2.3 apresenta um esquema de um modelo de via balastrada com continuidade longitudinal das camadas da via, balastro, sub-balastro e fundação, definida através de elementos finitos em estado plano de tensão.

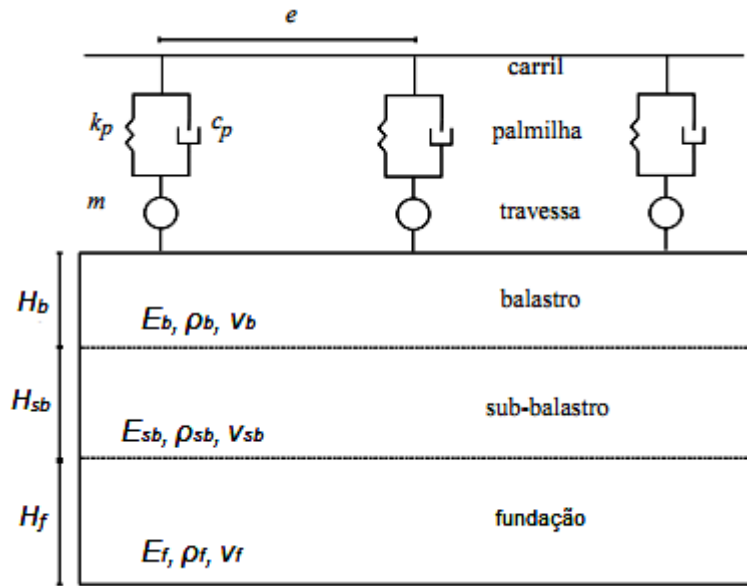


Fig. 2.3 – Modelo de via balastrada com continuidade longitudinal das camadas da via

sendo:  $e$ , espaçamento entre apoios;  $k_p$ , rigidez da palmilha;  $c_p$ , amortecimento da palmilha;  $m$ , massa da travessa;  $H_b$ ,  $H_{sb}$ ,  $H_f$ , respetivamente, espessura da camada de balastro, sub-balastro e fundação;  $E_b$ ,  $E_{sb}$ ,  $E_f$ , respetivamente, módulo de deformabilidade da camada de balastro, sub-balastro e fundação;  $\rho_b$ ,  $\rho_{sb}$ ,  $\rho_f$ , respetivamente, densidade da camada de balastro, sub-balastro e fundação;  $\nu_b$ ,  $\nu_{sb}$ ,  $\nu_f$ , respetivamente, coeficiente de Poisson da camada de balastro, sub-balastro e fundação.

#### MODELAÇÃO DO CARRIL

O carril pode ser modelado através de elementos do tipo viga de Euler-Bernoulli ou viga Rayleigh-Timoshenko, com características de rigidez à flexão do carril no primeiro caso e rigidez à flexão e deformação por corte na segunda (Vale 2010). A formulação de Euler-Bernoulli é uma simplificação da de Rayleigh-Timoshenko. O tipo de viga adotado depende da gama de frequências de vibração vertical da via, sendo a viga de Euler-Bernoulli adequada para frequências de excitação mais baixas e a de Rayleigh-Timoshenko para frequências mais elevadas. A viga de Euler-Bernoulli pode ser adotada quando se pretende ter em conta na análise frequências entre 0 e 500 Hz, uma vez que a deformação por corte pode ser desprezada, enquanto que a viga de Rayleigh-Timoshenko utiliza-se para ter em consideração frequências até 1000 Hz.

#### MODELAÇÃO DAS PALMILHAS

O comportamento dinâmico da via balastrada é altamente influenciado pelas características das palmilhas. Este elemento da via apresenta um comportamento complexo, uma vez que depende da solicitação, da frequência, da pré-carga e da temperatura (Vale 2010), caracterizado através da sua rigidez e do seu amortecimento.

Considerando as palmilhas como elementos com comportamento linear, a abordagem mais simples para modelação é através do modelo de Kelvin que considera uma mola e um amortecedor viscoso, colocados em paralelo como mostra a Fig. 2.4.

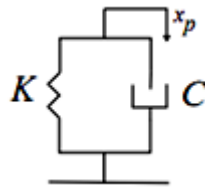


Fig. 2.4 – Esquema de modelação da palmilha pelo modelo de Kelvin

sendo:  $C$ , amortecimento viscoso ( $c_p$ );  $K$ , rigidez ( $k_p$ );  $x_p$ , deslocamento da palmilha, em compressão.

#### MODELAÇÃO DO BALASTRO, SUB-BALASTRO E FUNDAÇÃO

Conforme atrás referido, podem ser considerados modelos de via com apoios discretos ou modelos de via com continuidade longitudinal das camadas de balastro, sub-balastro e fundação.

Nos modelos com apoios discretos, as camadas da via são simuladas através de conjuntos mola-amortecedor, sendo portanto a rigidez e amortecimento os parâmetros a definir. Nos modelos de via com continuidade longitudinal, as camadas da via podem ser simuladas através de elementos de barra com molas e amortecedores na direção longitudinal ou através de elementos finitos em estado plano de tensão, sendo que para este último, os parâmetros a atribuir a cada camada são: o módulo de deformabilidade, a densidade, o coeficiente de Poisson e ainda o amortecimento dos materiais.

#### 2.4. SOLICITAÇÕES DA VIA FÉRREA

O comportamento dinâmico de via férrea balastrada é influenciado tanto pelas características da via como pelo tipo de solicitação (carga e frequência) a que esta é sujeita.

Relativamente à solicitação, há a distinguir a componente quase-estática, resultado da ação do peso do eixo e a componente dinâmica devido à excitação paramétrica e a irregularidades da via e da roda.

A frequência de excitação paramétrica devido à passagem de uma roda do comboio sobre o carril apoiado pontualmente em travessas, assim como a frequência de excitação devido a defeitos da via e da roda, constituem fontes de excitação sobre a via balastrada.

Em via perfeita, “a excitação dinâmica resulta do movimento do comboio sobre a via deformada em consequência da circulação do veículo sobre o carril apoiado de modo discreto”, como referido em Vale (2010), sendo a frequência de excitação obtida através da expressão 2.1.

$$f = V/e \quad (2.1)$$

onde:  $f$ , frequência;  $V$ , velocidade;  $e$ , espaçamento entre travessas.

#### 2.5. A PRESENÇA DE DEFEITOS NA VIA FÉRREA BALASTRADA

Os defeitos na via férrea balastrada podem ser pontuais ou distribuídos. Uma vez que nesta dissertação se estudará a influência de um defeito pontual da via no comportamento dinâmico da via a curto e a longo prazo, apenas se refere o modelo utilizado para este tipo de defeitos.

Os defeitos pontuais da via, devem-se a causas como: variação de rigidez da fundação, a existência de aparelhos de mudança de via, aparelhos de dilatação, passagens inferiores, existência de travessas soltas, etc. (Vale 2010) e provocam oscilações e vibrações no comboio, induzindo danos nos elementos da via e do comboio, entre outros.

Assim, podem ser de vários tipos e formas, sendo, na Fig. 2.5, indicada a forma geométrica e a expressão analítica para definir o defeito pontual considerado neste estudo, uma das formas geométricas de defeito mais frequentes em vias férreas balastradas.

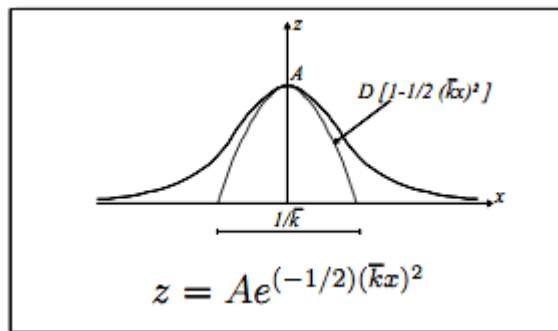


Fig. 2.5 – Forma e expressão analítica para definir defeito pontual da via

onde:  $A$  é o valor máximo do defeito pontual (amplitude), e  $\bar{k}$  o parâmetro que caracteriza a extensão do defeito pontual.

## 2.6. COMPORTAMENTO A LONGO PRAZO DA VIA FÉRREA BALASTRADA

A passagem repetida de tráfego ferroviário provoca assentamentos permanentes e gradualmente crescentes das camadas da via balastrada. O assentamento devido à passagem de cargas rolantes é composto por uma componente elástica, parcela recuperada após descarga e por uma componente residual que representa o assentamento permanente, acumulado ao longo da história de carregamento da via.

O assentamento total da via considera o assentamento das diferentes camadas que constituem a via, a camada de balastro, a camada de sub-balastro e a fundação. Estudos desenvolvidos por Selig e Waters (1994) mostram que a camada responsável por grande parte do assentamento total é a camada de balastro.

Na evolução do assentamento permanente da via, existem duas fases distintas: a primeira fase ocorre durante o período de compactação dos materiais e tem uma evolução elevada e rápida; a segunda fase do assentamento dá-se durante a exploração da via e tem uma evolução mais lenta.

Uma vez que o assentamento da camada de balastro representa a parcela mais significativa do assentamento global da via, neste estudo, a previsão da evolução do assentamento permanente da via considera apenas a contribuição desta camada. Assim, nesta secção são apresentadas algumas leis que permitem simular a evolução da deformação permanente da camada de balastro.

## MODELOS DE ASSENTAMENTO DA CAMADA DE BALASTRO

Existe na bibliografia uma grande variedade de leis que permitem efetuar a previsão da deformação permanente da camada de balastro. Estas leis são normalmente estabelecidas através de ensaios laboratoriais dos materiais que constituem a camada de balastro, ensaios de campo, ou ensaios à escala reduzida e permitem estimar a deformação da camada através da determinação direta do assentamento de toda a camada ou através da previsão da deformação permanente dos materiais que a constituem.

Apresentam-se no Quadro 2.1 alguns dos modelos identificados para a determinação da deformação da camada de balastro, através da avaliação direta do assentamento da camada. Salienta-se que todos os modelos referidos são aplicados a camadas de balastro tradicionais, com exceção do modelo de Indraratna et al. (2007) e do de Indraratna e Nimbalkar (2013), que são referentes a camadas de balastro estabilizadas com geossintéticos e do modelo de Kennedy et al. (2013), que utiliza polímeros para o reforço da camada de balastro.

É usual, os autores irem desenvolvendo os seus modelos iniciais, pela consideração de parâmetros adicionais, dado que a determinação do assentamento de materiais granulares é complexa, uma vez que depende de muitos fatores. Por exemplo, veja-se o primeiro modelo apresentado no Quadro 2.1, no qual os autores consideram a reação na base das travessas para determinar o assentamento da via. Já o modelo de Sato (1995) considera a velocidade de circulação, a pressão sobre as travessas ou a aceleração vertical do balastro como fatores para a determinação do assentamento. Este autor propôs dois modelos diferentes: um sem distinção entre a passagem de eixos com valores de carga diferente; outro fazendo essa distinção, o que constitui uma situação mais realista, na verdade a passagem de eixos com maior carga provoca, naturalmente, uma maior degradação da via. Thom (2006) propôs também um primeiro modelo sem distinção entre a passagem de eixos com valores de carga diferente e um segundo já considerando a passagem de eixos com carga diferente. Neste segundo modelo foram ainda tidos em conta outros fatores tais como: a tensão na base das travessas e a rigidez da fundação.

Dos vários modelos apresentados no Quadro 2.1, o primeiro, onde se considera que o assentamento da camada de balastro evolui segundo uma lei logarítmica. Trata-se de um dos modelos mais testados, indicando-se, no Quadro, quatro autores que o validaram, tendo propostos diferentes valores para os parâmetros.

Refere-se ainda que todos os modelos analisados são função do número de ciclos de carga, uma vez que, no contexto desta dissertação, só estes têm especial interesse para o estudo realizado.

Quadro 2.1 – Leis de assentamento permanente para o balastro

Lei	Autor	Parâmetros	Metodologia	Referido por
$S_N = S_1(1 + c \cdot \log N)$  <i>sendo, <math>S_1 = s \cdot F_t^{1,6}</math></i>	Raymond et al. (1975)	$c = 0,43$		Indraratna e Nimbalker (2013)
	Hettler (1984)	$c = 0,25 \text{ a } 0,55$		Guérin (1996) Xiaoyi Shi (2009)
	Mauer (1995)	$c = 0,43$ $s = 0,00095 \text{ mm/kN}^{1,6}$		Alves Ribeiro (2012)
	Hunt (1996)	$c = 0,43$ $s = 0,001 \text{ a } 0,004 \text{ mm/kN}^{1,6}$		Alves Ribeiro (2012)
$S_N = k_1 \cdot N^{0,2} + k_2 \cdot N$	Shenton (1978)	$k_1$ $k_2$	Ensaaios à escala real	Guérin (1996) Xiaoyi Shi (2009) Vale (2010) Kennedy et al. (2013) Vale e Calçada (2014)
$S_N = g + h \cdot \log N + k \cdot N$ <i>para <math>N \leq 200\,000</math></i>  $S_N = i + j \cdot N$ <i>para <math>N &gt; 200\,000</math></i>	Jefferies e Marich (1987)	$g = 90,0$ $h = 0,006$ $i = 12,5$ $j = 1,5 \cdot 10^{-5}$ $k = 1,5 \cdot 10^{-4}$		Indraratna e Nimbalker (2013)
$E(T) = E_0 + k \cdot T^\alpha \cdot F_{din}^\beta$	ORE (1988)	$k$ $\alpha = 1$ $\beta = 3$	Análise estatística	Vale (2010) Vale e Calçada (2014)
$S_N = \gamma(1 - e^{-\alpha \cdot N}) + \beta \cdot N$	Sato (1995)	$\alpha = 0,018$ $\beta = 1,2 \cdot 10^{-5}$ $\gamma = 12,5$		Xiaoyi Shi (2009); Vale (2010) Alves Ribeiro (2012) Indraratna e Nimbalker (2013) Vale e Calçada (2014)
$S_N = 2,09 \cdot 10^3 \cdot T^{0,31} \cdot V^{0,98} \cdot M^{1,1} \cdot L^{0,21} \cdot P^{0,26}$	Sato (1995)	$M$ $L$ $P$		Vale (2010) Vale e Calçada (2014)

Quadro 2.1 – Leis de assentamento permanente para o balastro (continuação)

Lei	Autor	Parâmetros	Metodologia	Referido por
$\frac{d\tau}{dN} = \alpha \cdot d^\beta$	Guérin (1996)	$\alpha$ $\beta$	Ensaaios à escala reduzida 1/3	Guérin (1996) Alves Ribeiro (2012) Vale e Calçada (2014)
$S_{opt} = 1,57 \cdot p \cdot \Delta N + 3,04 \cdot p^{1,21} \ln N$ $S_{méd} = 1,89 \cdot p \cdot \Delta N + 15,20 \cdot p^{1,21} \ln N$ $S_{pess} = 2,33 \cdot p \cdot \Delta N + 5,15 \cdot p^{1,21} \ln N$	Universidade Técnica de Muniqué (2000)		Ensaaios em laboratório	Vale (2010) Vale e Calçada (2014)
$S_N = S_1 + \frac{e \log N}{1 + f \log N}$	Neidhart (2001)	$e = 3,6$ $f = 0,2$		Indraratna et al. (2007) Indraratna e Nimbalkar (2013)
$S_N = (\log_{10} N - 2,4)^2$	Thom (2006)		Ensaaios à escala real	Xiaoyi Shi (2009)
$S_N = (\log_{10} N - 2,4)^2 \cdot \frac{\sigma}{160} \cdot \frac{47}{k}$	Thom (2006)		Ensaaios à escala real	Xiaoyi Shi (2009)
$S_N = S_1 \cdot N^y$	Bruni et al. (2002)	$y = 0,00095 \text{ mm/kN}^{0,85}$ $a = 0,85$		Alves Ribeiro (2012)
sendo, $S_1 = s \cdot F_l^a$	Indraratna et al. (2007)	$y = 0,106$	Ensaaios em laboratório à escala real (triaxial)	Indraratna et al. (2007) Indraratna e Nimbalkar (2013)
$S_N = c + d \cdot \ln N$	Indraratna et al. (2011)	$c = 4,3$ $d = 1,85$		Indraratna e Nimbalkar (2013)
$S_N = 1395 \cdot t^{-1,2707} \cdot N^{0,23}$	Kennedy et al. (2013)	$t$	Ensaaios em laboratório à escala real	Kennedy et al. (2013)
$S_N = S_1(1 + a \log N + 0,5 \cdot b \cdot \ln N^2)$	Indraratna e Nimbalkar (2013)	$a = 0,43$ $b = 1,6$	Ensaaios em laboratório à escala real (triaxial)	Indraratna e Nimbalkar (2013)



Para além dos modelos definidos a partir do assentamento no balastro, há outros que consideram a deformação permanente dos materiais de balastro para a determinação da deformação da camada de balastro. No Quadro 2.2 apresentam-se esses modelos que são função do estado de tensão a que o material está sujeito e do número de ciclos de carga.

O primeiro modelo apresentado considera que a deformação permanente evolui segundo uma lei logarítmica que é função da deformação permanente provocada pelo primeiro ciclo de carga ( $\varepsilon_1$ ) é um dos modelos mais testados.

Uma vez que, no estudo paramétrico realizado nesta dissertação, foi considerada a lei proposta pela ORE (1970), apresenta-se no quadro abaixo, efetua-se uma descrição mais detalhada desta lei.

Os autores desta lei concluíram que a taxa de crescimento da deformação permanente do balastro se reduz consideravelmente com o aumento do número de ciclos de carga. Verificaram ainda que o primeiro ciclo de carga produz uma deformação muito elevada e que a deformação posterior evolui segundo uma lei logarítmica conforme a expressão 2.2.

$$\varepsilon_N = \varepsilon_1 \cdot (1 + c \cdot \log N) \quad (2.2)$$

sendo:  $\varepsilon_N$ , deformação permanente do balastro após  $N$  ciclos de carga;  $c$ , uma constante igual a 0,20;  $N$ , número de ciclos de carga;  $\varepsilon_1$ , deformação permanente provocada pelo primeiro ciclo de carga e dada pela expressão 2.3.

$$\varepsilon_1 = 0,082 \cdot (100n_p - 38,2) \cdot (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \quad (2.3)$$

sendo:  $n_p$ , porosidade da camada de balastro;  $(\sigma_1 - \sigma_3)$ , tensão de desvio a que o material está sujeito.

A porosidade da camada de balastro é função do grau de compactação inicial e do tipo de balastro, variando normalmente entre 0,40 e 0,50 (ORE 1970).

Conforme foi referido anteriormente, a deformação permanente da camada de balastro pode ser dividida em duas fases, sendo a primeira fase caracterizada por um grande incremento de deformação permanente que é normalmente associada à estabilização inicial da camada de balastro e a segunda fase característica da evolução da deformação permanente da via com a passagem do tráfego ferroviário. Neste estudo pretende-se apenas considerar a segunda fase de carregamento tendo-se estipulado que a primeira fase corresponde a 100000 ciclos de carga. Assim a lei que traduz a evolução da deformação da camada de balastro passa a ser dada pela expressão 2.4 (Alves Ribeiro 2012).

$$\varepsilon_N = \varepsilon_1 \cdot \left( c \cdot \log \left( \frac{N + N_i}{N_i} \right) \right) \quad (2.4)$$

onde  $N_i$  corresponde ao número de ciclos de carga da primeira fase,  $\varepsilon_1$  a deformação permanente experimentada no primeiro ciclo de carga e  $c$  uma constante tomado igual a 0,20. Admitindo que a

camada de balastro se encontra bem compactada considerou-se a porosidade ( $n_p$ ) igual a 0,40, que é o valor mínimo do intervalo de variação proposto para este parâmetro.

Quadro 2.2 – Leis de deformação permanente para o balastro

Lei	Autor	Parâmetros	Metodologia	Referido por
$\varepsilon_N = \varepsilon_1(1 + c \cdot \log N)$	ORE (1970)	$c = 0,20$	<i>Estudos em laboratório e no campo</i>	Guérin (1996); Fortunato (2005) Alves Ribeiro (2012) Ionescu (2004)
	Shenton (1978)	$c = 0,20$	<i>Ensaaios laboratoriais (triaxial)</i>	Guérin (1996) Vale e Calçada (2014)
	Hettler (1987)	$c = 0,20$	<i>Ensaaios laboratoriais (triaxial)</i>	Guérin (1996)
	Alva-Hurtado e Selig (1981)	$c = 0,20 \text{ a } 0,40$		Xiaoyi Shi (2009) Ionescu (2004)
$\varepsilon_N = \beta \cdot N^\alpha \cdot Q$	Shenton (1978)	$\alpha$ $\beta$		Guérin (1996)
$\varepsilon_N = (fnN) \cdot L \cdot \left(\frac{q^0}{p^0}\right)_{máx}^{2,8}$	Pappin (1979)			Xiaoyi Shi (2009)
$\varepsilon_N = -\frac{1}{L} \cdot \ln \left[ \frac{q_f - q_{máx}}{q_f} - \frac{1}{M_1} \left( \sigma_t + \frac{1}{3} \sigma_s \right) \cdot \ln N \right]$	Thom (1988)	$L$ $M_1$		Xiaoyi Shi (2009)
$\varepsilon_N = \varepsilon_1 \cdot N^b$	Selig e Waters (1994)	$b = 0,21$	<i>Ensaaios laboratoriais e medições em via de teste</i>	Alves Ribeiro (2012)
$\varepsilon_N = \varepsilon_1 \cdot \left( c \cdot \log \left( \frac{N + N_i}{N_i} \right) \right)$	Alves Ribeiro (2012)	$c = 0,20$		Alves Ribeiro (2012)

Sendo:  $p^0$ , tensão média efetiva modificada;  $q^0$ , tensão de desvio modificada;  $q_f$ , tensão de desvio;  $q_{máx}$ , tensão de desvio máxima;  $\sigma_s$ , tensão média;  $\sigma_t$ , tensão de corte.

## **2.7. CONCLUSÕES**

Neste capítulo, são descritos os elementos constituintes da via férrea balastrada e é feita uma breve referência a modelos numéricos usados na modelação da via férrea balastrada e de defeitos pontuais da via.

Tendo em vista a consideração da evolução da deformação permanente da via nas simulações numéricas realizadas efetua-se uma revisão de diferentes leis de deformação da camada de balastro existentes na bibliografia.

Estas considerações são imprescindíveis para o estudo da avaliação do comportamento da via férrea balastrada a curto e longo, sendo a base para a modelação dinâmica do sistema via-veículo apresentada do próximo capítulo.



# 3

## MODELAÇÃO DINÂMICA DO SISTEMA VIA-VEÍCULO

### 3.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, aborda-se a modelação dinâmica do sistema via-veículo que será adotada para a avaliação do comportamento da via férrea balastrada no capítulo 4, descrevendo-se a modelação da via férrea balastrada, a modelação do veículo e da interação veículo-via e ainda a modelação do comportamento a longo prazo.

Na secção 3.2, apresentam-se as características geométricas e mecânicas dos vários elementos constituintes da via férrea balastrada e faz-se a descrição do modelo de elementos finitos da via, desenvolvido por Alves Ribeiro (2012), utilizado neste trabalho.

Na secção 3.3, apresentam-se as características do comboio considerado no estudo- o *Eurostar*. Ainda nesta secção, descrevem-se os modelos de veículo e os de interação via-veículo. Sobre este assunto, apresenta-se a teoria de Hertz, que permite simular a interação veículo-via através da rigidez de contacto, e faz-se uma curta referência à simulação do contacto entre dois corpos no programa ANSYS.

Por fim, na secção 3.4, apresenta-se o método de simulação do comportamento a longo prazo da via proposto por Alves Ribeiro (2012)

### 3.2. DESCRIÇÃO DA VIA FÉRREA BALASTRADA

Como referido anteriormente, a via balastrada é composta por carris, palmilhas, travessas, balastro e sub-balastro estando apoiada sobre uma fundação (Fig. 3.1). No Quadro 3.1 e na Fig. 3.1, indicam-se as características geométricas consideradas neste estudo na caracterização da via balastrada.

Quadro 3.1 – Características geométricas da via

Componente	Parâmetro
Balastro	Espessura = 0,36 m
Sub-balastro	Espessura = 0,20 m
Fundação	Espessura = 6,00 m
Travessas	Espaçamento = 0,60 m

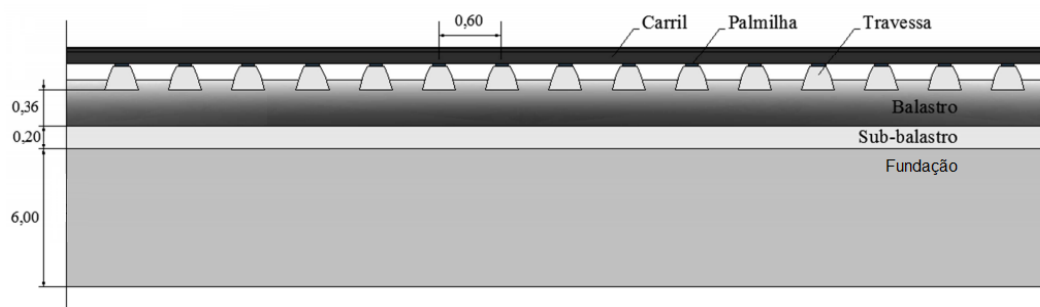


Fig. 3.1 - Representação esquemática do perfil longitudinal da via (adaptado de Alves Ribeiro 2012)

As características geométricas e mecânicas da via considerada no estudo correspondem aos valores adotados por Alves Ribeiro (2012) na sua tese de doutoramento.

Relativamente ao carril adotado, este é do tipo UIC60 e as suas características mecânicas são apresentadas no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Características mecânicas do carril UIC60 (Alves Ribeiro 2012)

Carril				
E (Pa)	$\nu$ (-)	I (m <sup>4</sup> )	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
$200 \times 10^9$	0,30	$30,4 \times 10^{-6}$	$7,67 \times 10^{-3}$	7850

Para as palmilhas, considerou-se como valor de rigidez  $200 \times 10^6$  N/m e como valor de amortecimento  $30 \times 10^3$  N.s/m. Considerou-se ainda, que as travessas são de betão armado pré-esforçado, apresentando secção trapezoidal com 0,15 m no topo, 0,30 m na base e 0,225 m de altura e que a sua massa é de 315 kg.

As características mecânicas do balastro, sub-balastro e fundação estão indicadas no Quadro 3.3, correspondendo aos valores sugeridos pela UIC719Rb (2008).

Quadro 3.3 – Características mecânicas adotadas para as camadas da via

Camada da via	E (MPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$ (-)
Balastro	130	1530	0,2
Sub-balastro	120	1935	0,3
Fundação	80; 300	2040	0,3

Como se verifica no Quadro 3.3, foram considerados dois valores diferentes para o módulo de deformabilidade da fundação. O módulo de deformabilidade de 80 MPa foi considerado para as análises: comportamento estático da via, comportamento dinâmico a curto e longo prazo da via perfeita e comportamento dinâmico a curto e longo prazo da via com defeito pontual. O valor de módulo de deformabilidade da fundação de 300 MPa foi considerado para realizar a análise da influência da velocidade de circulação do veículo no comportamento a curto prazo da via perfeita.

#### MODELAÇÃO DA VIA FÉRREA BALASTRADA

O modelo da via férrea utilizado neste trabalho foi desenvolvido por Alves Ribeiro et al. (2008) e consiste num modelo bidimensional em que o carril foi modelado através de elementos de viga com características de flexão, rigidez e massa equivalentes às do carril UIC60. Os elementos de viga são do tipo Euler-Bernoulli. As palmilhas foram modeladas através de elementos mola-amortecedor e as travessas, as camadas de balastro e sub-balastro e a camada de fundação modeladas através de elementos finitos de quatro nós em estado plano de tensão. A secção plana equivale a uma via completa, dado que i) os elementos de viga do carril consideram as propriedades dos dois carris; ii) a massa das travessas é igual a 315 kg; iii) os conjuntos mola-amortecedor colocados entre o carril e a travessa simulam as duas palmilhas, uma sob cada carril (Alves Ribeiro 2012).

Relativamente à modelação da via, sintetiza-se os aspetos considerados por Alves Ribeiro (2012) para a sua definição:

- são consideradas apenas cargas verticais, desprezando-se a dinâmica transversal da via uma vez que o problema em análise é essencialmente vertical;
- admite-se que a via se encontra em alinhamento reto, logo pode considera-se simetria no modelo e no carregamento, relativamente a um eixo longitudinal à via.

Ainda sobre a definição geométrica do modelo bidimensional, refere-se que Alves Ribeiro et al. (2009) calibrou o modelo a partir de um modelo tridimensional de elementos finitos com características geométricas e mecânicas idênticas às do modelo bidimensional.

Os elementos em estado plano de tensão adotados para a modelação permitem definir uma largura no plano perpendicular ao modelo, que constitui o parâmetro de calibração e que é determinado recorrendo ao modelo tridimensional.

Uma representação esquemática do modelo bidimensional calibrado é apresentada na Fig. 3.2.



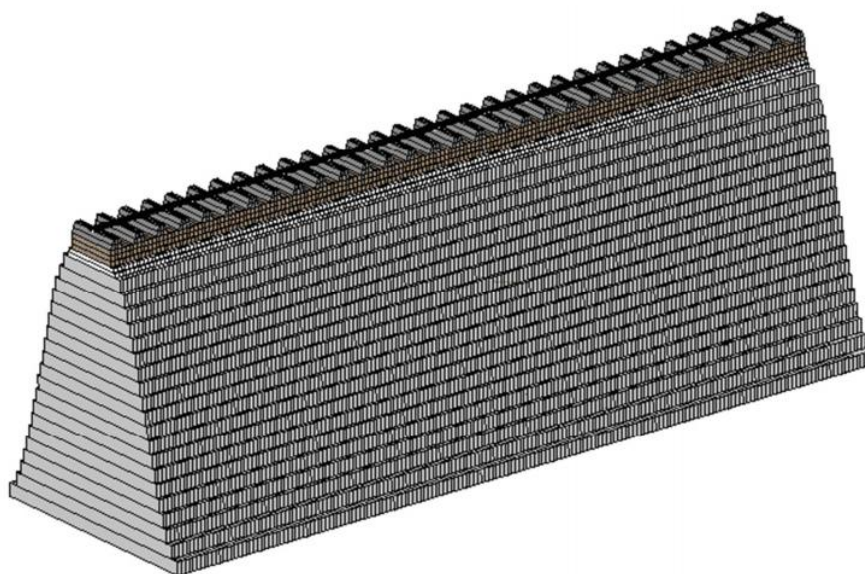


Fig. 3.2 – Representação esquemática do modelo bidimensional calibrado (Alves Ribeiro 2012)

A calibração estática é complementada por uma calibração dinâmica que permite encontrar os parâmetros de amortecimento do modelo bidimensional.

Uma questão importante a ter em conta na modelação é que a imposição de deslocamentos nulos ou livres nas fronteiras do modelo cria condições não reais de propagação de ondas propiciando a sua reflexão e devolução ao sistema modelado, perturbando assim os resultados. Uma das técnicas para ultrapassar esta dificuldade, consiste em considerar condições fronteira que simulem as condições reais (Faria 1988). Outra metodologia é considerar um modelo suficientemente extenso e eliminar os resultados afetados pela reflexão das ondas de propagação, técnica que tem como desvantagem aumentar o tempo computacional pelo maior número de elementos finitos do modelo.

As condições de não-reflexão nas fronteiras do modelo são simuladas através de elementos amortecedores do tipo viscoso nas direções normal e tangencial às fronteiras do modelo. A Fig. 3.3 apresenta um pormenor do elemento amortecedor colocado na fronteira do modelo.

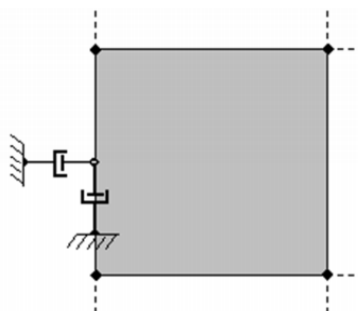


Fig. 3.3 – Pormenor da colocação de um elemento amortecedor na fronteira do modelo (Alves Ribeiro 2012)

Segundo Alves Ribeiro (2012), tendo-se por base os trabalhos de White et al. (1977) relativos à propagação de ondas num meio isotrópico bidimensional, a definição dos parâmetros de

amortecimento para um modelo em estado plano de tensão a matriz de amortecimento seria dada pela expressão:

$$C = \frac{8G}{15\pi V_s} \begin{bmatrix} 18s + 2 - 20s^3 & 0 \\ 0 & 2s + 3 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

sendo:  $G$ , o módulo de distorção do material;  $V_s$ , a velocidades de propagação das ondas  $S$  no meio e  $s$  parâmetro dado pela expressão 3.2.

$$s = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \quad (3.2)$$

sendo  $\nu$  o coeficiente de Poisson do material.

Relativamente às condições de apoio do modelo são impostos deslocamentos nulos na direção vertical e longitudinal na base do modelo através de apoios, assumindo-se assim que o firme se encontra a este nível. Na Fig. 3.4, apresenta-se um pormenor da condição de apoio fronteira inferior do modelo, no programa ANSYS.

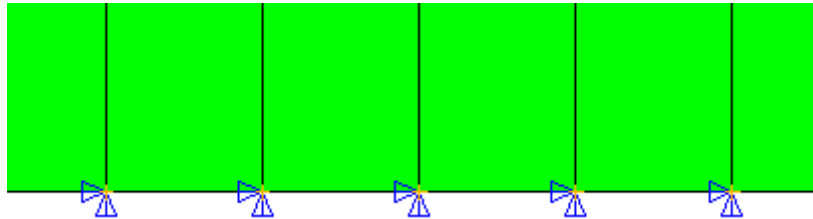


Fig. 3.4 – Pormenor condições de apoio da estrutura (fronteira inferior)

O modelo considerado para a análise dinâmica apresenta uma extensão de 72,3 m, sendo composto por um total de 26500 elementos finitos. No entanto, com o intuito de reduzir tempos de cálculo, apenas para o estudo do comportamento da via perfeita a longo prazo adotou-se um modelo mais pequeno, com uma extensão de 42,3 m, constituído por 9233 elementos finitos.

Para uma melhor visualização da modelação da via considerada, apresenta-se na Fig. 3.5, uma parte do modelo bidimensional em estado plano de tensão modelado através do ANSYS, adotado neste estudo.

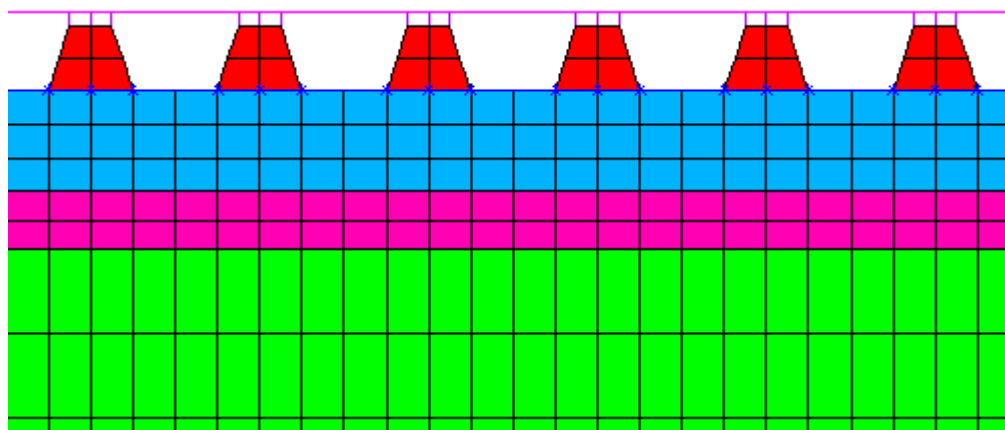


Fig. 3.5 – Modelo bidimensional em estado plano de tensão

Refere-se que na modelação da via se teve em conta o contacto travessa-balastro pelo que foi necessário considerar o efeito da gravidade na parte superior do modelo (carril e travessas).

### 3.3. MODELAÇÃO DO VEÍCULO E DA INTERAÇÃO VEÍCULO-VIA

O estudo dinâmico da via férrea engloba dois sistemas fundamentais que se caracterizam por um conjunto de frequências próprias de vibração, o veículo e a via. A interação entre o sistema veículo-via dá-se através do contacto devido à circulação das rodas do veículo sobre os carris da via (Alves Ribeiro 2012).

#### 3.3.1. MODELAÇÃO DO VEÍCULO

Uma modelação mais ou menos completa do veículo depende fundamentalmente do objetivo do estudo e gama de frequências de interesse. A consideração apenas da carga vertical transmitida pelas rodas à via constitui a forma mais simples de modelar o veículo. Neste caso, o modelo é constituído por uma carga móvel, que permite apenas estudar o efeito das frequências de excitação derivadas da passagem do veículo na via, uma vez que não é considerada a interação roda-carril. A forma mais completa de modelar o veículo consiste em considera-lo todo, sendo que esta tem um maior interesse quando por exemplo se pretende estudar aspetos como o conforto dos passageiros quando o veículo circula em determinadas zonas da via (Alves Ribeiro 2012).

Existe na bibliografia uma variedade imensa de modelos de veículo, que vão desde simples modelos 2D a modelos 3D. Neste estudo, como referido, faz-se uma análise 2D, por isso, os modelos 3D de veículos não são descritos.

Apresenta-se na Fig. 3.6, quatro modelos elementares de meio eixo do veículo: uma carga móvel, meio eixo, um quarto de bogie e um oitavo de veículo. Nas figuras, os parâmetros indicados representam:  $P$ , carga por eixo;  $M$ , massa do conjunto eixo-roda;  $k_H$ , rigidez de contacto roda-carril;  $M_b$ , massa do bogie;  $k_1$  e  $k_2$ , rigidez da suspensão primária e suspensão secundária, respetivamente;  $c_1$  e  $c_2$ , amortecimento da suspensão primária e suspensão secundária, respetivamente;  $M_c$ , massa da caixa. Os graus de liberdade são:  $z_r$ ,  $z_b$  e  $z_c$ , respetivamente, deslocamento vertical da roda, deslocamento vertical do bogie e deslocamento vertical da caixa.

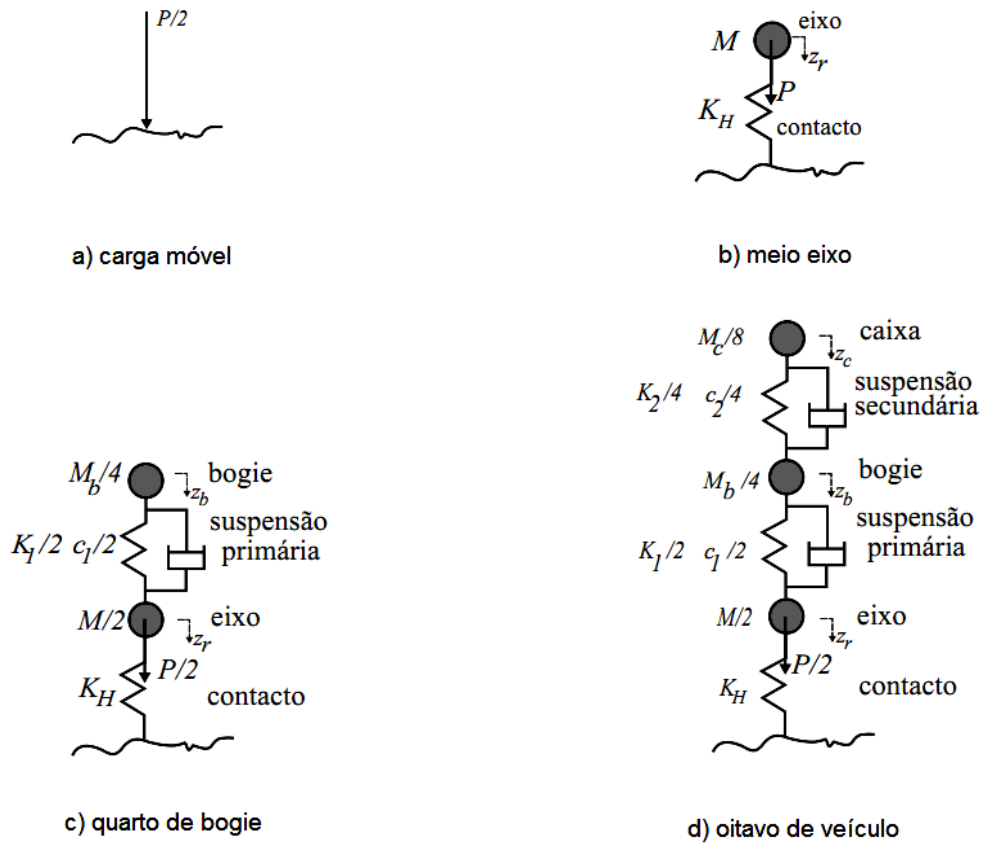


Fig. 3.6 – Modelos elementares em 2D de meio eixo do veículo (Vale 2010)

Neste estudo, para modelação do veículo foi considerado um modelo similar ao modelo *b) meio eixo* apresentado na Fig. 3.7, mas dado que a modelação da via é feita por uma via completa, ou seja, considerando os dois carris da via, a modelação do veículo será feita não para meio eixo mas sim para um eixo completo. Posto isto, o modelo de veículo utilizado será o representado na Fig. 3.7. Este modelo é então composto por uma massa concentrada que representa a massa do conjunto eixo-roda ( $M$ ), e pela rigidez de contacto ( $K_H$ ) que simula a rigidez do contacto roda-carril.

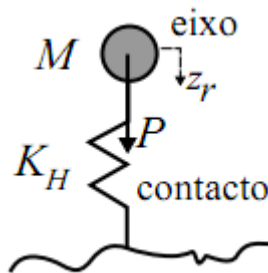


Fig. 3.7 - Modelo elementar em 2D de um eixo do veículo

Tendo em conta o exposto, a modelação no programa ANSYS efetua-se através de um elemento de massa concentrada e um elemento mola-amortecedor.

As análises dinâmicas nos capítulos 4 e 5 consideram um eixo do comboio *Eurostar*. A título indicativo, refere-se que este comboio faz a ligação entre Londres e Paris, e ainda, entre Londres e Bruxelas, passando pelo canal da Mancha através do *Eurotúnel*. Este veículo tem 386,67 metros de comprimento e é composto por 18 carruagens, uma locomotiva em cada extremidade e três tipos de carruagens. As carruagens R1 (fazem a transição entre a locomotiva e as restantes carruagens), as carruagens R2 a R8 (parte articulada do comboio), e as carruagens R9 (localizadas no eixo de simetria).



Fig. 3.8 – Comboio *Eurostar*

Recorrendo a ERRI (1999), as características do *Eurostar*, considerando o primeiro eixo do comboio, verifica-se que a massa do conjunto eixo-roda corresponde a 1700 kg e a carga por eixo é de 170 kN, sendo estes, os valores considerados para as análises.

### 3.3.2. MODELAÇÃO DO CONTACTO E DA INTERAÇÃO VIA-VEÍCULO

Para ser considerada a influência das características dinâmicas do veículo no comportamento dinâmico da via, é necessário não só definir os modelos de via e veículo, mas também de contacto entre estes dois elementos (Vale 2010).

Uma vez que os elementos que modelam a roda e o carril não apresentam deformabilidade é necessário considerar entre ambos uma mola que simula a deformação dos corpos em contacto (Alves Ribeiro 2012). Por esta razão, o modelo de veículo adotado neste estudo considera a interação roda-carril através da rigidez de contacto.

O contacto roda-carril na interação vertical veículo-via pode ser considerado através de modelos de contacto elástico não linear como a teoria de Hertz, que considera o contacto elástico não linear sem atrito entre corpos.

No modelo de Hertz, a força não linear de contacto  $F$  é dada pela equação 3.3:

$$F = \begin{cases} C_H(x - y - \bar{r})^{3/2} & \text{se } x - y - \bar{r} \geq 0 \\ 0 & \text{se } x - y - \bar{r} \leq 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

onde:  $x$  é o deslocamento vertical da roda;  $y$  é o deslocamento do carril;  $\bar{r}$  é a ordenada do perfil de irregularidades do carril;  $C_H$  é a rigidez do contacto hertziano.

O modelo de contacto elástico linear é um modelo simplificado e considera que, entre os dois corpos, existe apenas deformação elástica linear.

Vale (2010) estudou a influência da consideração do modelo linear para o contacto roda-carril em diferentes cenários de circulação e de qualidade de via, tendo verificado que o efeito da não linearidade do contacto roda-carril pode ser desprezada quando a variação da carga dinâmica for inferior ao dobro do valor da carga estática (carga de linearização).

No modelo elástico linear a rigidez linearizada é definida pela expressão 3.4:

$$k_H = \frac{dF}{d\delta} = \frac{3}{2} C_H \delta^{1/2} = \frac{3}{2} C_H (F/C_H)^{1/3} = \frac{2}{3} C_H^{2/3} F^{1/3} \quad (3.4)$$

onde:  $\delta = x - y - \bar{r}$  é o deslocamento relativo entre a roda e o carril;  $F$  é a carga de linearização.

Neste trabalho, considerou-se contacto elástico linear entre roda e carril, dado não ser expectável grande variação da carga dinâmica. Deste modo, a rigidez de contacto ( $K_H$ ) veículo-via foi admitida tendo por base os fundamentos da teoria de Hertz utilizada noutros estudos similares a este, tendo-se considerado a rigidez linearizada igual a  $1,35 \times 10^9$  N/m (por roda).

Relativamente à imposição das condições de contacto, esta consiste na resolução matemática de um problema de controlo da não penetração das superfícies dos dois corpos através de métodos de resolução de problemas de otimização global não linear (Vale 2010). No estudo realizado, a modelação do contacto no programa ANSYS efetuou-se através de um contacto do tipo ponto-linha estabelecido entre a extremidade inferior da mola da massa suspensa, e os elementos de viga que modelam o carril. Assim, os elementos de viga são “revestidos” por elementos alvo e a extremidade da mola “revestida” por um elemento de contacto.

Na Fig. 3.9, apresenta-se um pormenor do modelo de contacto massa suspensa-viga.

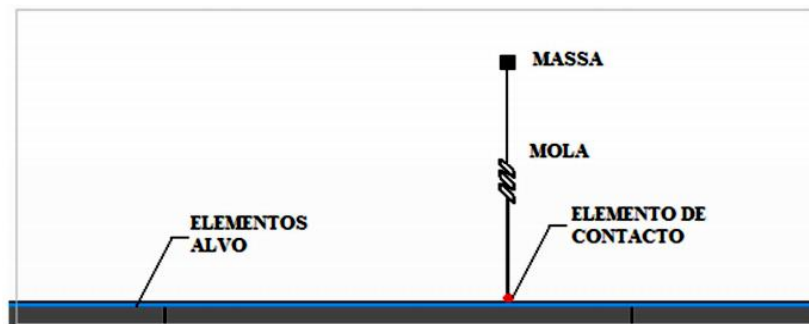


Fig. 3.9 – Pormenor da modelação do contacto massa suspensa-viga (adaptado de Alves Ribeiro (2012))

Relativamente às opções de contacto, considerou-se para este estudo o método da penalidade, atualização do parâmetro da penalidade em cada iteração de cálculo, que as superfícies de contacto podem experimentar separação e que o contacto se desenvolve sempre perpendicularmente aos elementos alvo (Alves Ribeiro 2012).

A interação travessa-balastro é estabelecida de forma semelhante à interação roda-carril, procurando-se que os nós da base das travessas não penetrem nos elementos da camada de balastro.

### 3.4. MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO A LONGO PRAZO DA VIA

Conforme referido em 2.6, neste caso de estudo, a previsão da evolução da deformação permanente da via considera apenas a contribuição da deformação permanente da camada de balastro.

#### MÉTODO DE SIMULAÇÃO DO ASSENTAMENTO PERMANENTE DA VIA

O método de simulação do assentamento permanente da via utilizado nesta dissertação foi proposto por Alves Ribeiro (2012) e consiste num processo iterativo mediante a articulação entre o programa ANSYS e o programa MATLAB.

No programa ANSYS é efetuada a modelação numérica do veículo e da via e todo o processo de pré e pós-processamento dos resultados, enquanto no programa MATLAB se efetua a leitura dos resultados da análise dinâmica, aplicação das leis de deformação e a determinação da deformação permanente.

A Fig. 3.10 apresenta o esquema do processo iterativo de simulação da deformação permanente da via.

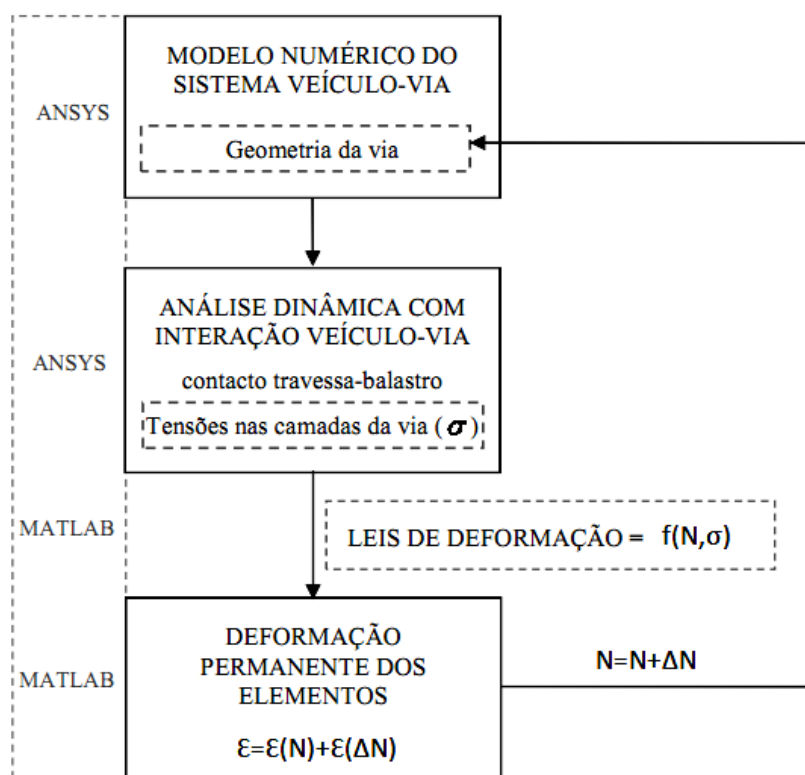


Fig. 3.10 – Representação esquemática do processo de simulação da deformação permanente da via (Alves Ribeiro 2012)



A circulação do veículo provoca nas camadas da via um campo de tensões multidirecional, que constitui neste método a base de cálculo do assentamento permanente.

Através da modelação das camadas da via em elementos finitos, é possível recolher com rigor a informação sobre o estado de tensão instalado na via aquando da passagem do veículo. Assim, após a análise dinâmica retira-se a informação sobre as tensões verticais, horizontais e tangenciais em todos os elementos finitos. A variação das tensões ao longo do tempo em cada elemento finito é armazenada, permitindo assim determinar a evolução das tensões principais ao longo do tempo para cada elemento finito. Os valores máximos das tensões principais são então utilizados como dado de entrada para no cálculo da deformação permanente.

A deformação permanente de cada elemento é determinada no programa MATLAB, sendo depois armazenada e fornecido ao programa ANSYS para ser aplicada a cada elemento finito, alterando assim a geometria global da via.

Uma vez que a passagem de apenas um eixo provoca uma deformação permanente muito pequena, o processo de simulação não é efetuado ciclo a ciclo mas sim em incrementos de ciclos ( $\Delta N$ ), assumindo-se que entre incrementos o estado de tensão nas camadas da via se mantém constante.

Ao fim de cada conjunto de  $\Delta N$  ciclos avalia-se o novo estado de tensão. Este procedimento induz que para um mesmo momento se obtenha valores de deformação permanente diferentes, pelo que é necessário fazer a transição entre os estados de tensão. Assim, Alves Ribeiro (2012) considerou para a transição entre estados de tensão, a metodologia proposta por Ford (1995).

Depois de cada análise dinâmica avaliam-se os efeitos da nova geometria da via no comportamento dinâmico. Sendo este processo repetido as vezes que se pretenda.

As considerações e simplificações relativamente a este método na simulação do assentamento permanente da via são:

- considera-se em todas as análises dinâmicas a interação veículo-via;
- considera-se que existe contacto entre a base da travessa e o topo da camada de balastro;
- assume-se que entre incrementos de ciclos de carga, as tensões nos elementos finitos se mantêm constantes;
- efetua-se a determinação da deformação permanente elemento a elemento;
- considera-se a deformação permanente apenas no plano de carregamento (direção vertical);
- não se considera a degradação originada, por exemplo, por fatores meteorológicos, condições de fluência ou assentamentos por consolidação dos solos de fundação, dado que a deformação das camadas da via resulta apenas das leis de deformação adotadas.

#### LEI DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE DA CAMADA DE BALASTRO

Uma vez que apenas se tem em conta o contributo da camada de balastro para o assentamento permanente da via, somente se adota uma lei de deformação permanente. Caso se pretendesse atender também às restantes camadas da via (sub-balastro e fundação), seria necessário considerar igualmente uma lei de deformação permanente para cada uma.

Neste estudo, para a camada de balastro considerou-se a lei de deformação apresentada pela ORE (1970).



### 3.5. CONCLUSÕES

Neste capítulo, descreve-se a modelação da via férrea balastrada, a modelação do veículo e da interação veículo-via e a modelação do comportamento a longo prazo, sendo o principal objetivo apresentar a modelação para a avaliação do comportamento da via balastrada feita no próximo capítulo.

Em resumo, apresenta-se as considerações feitas para a modelação:

- a secção transversal do modelo equivale a uma via completa;
- o carril é do tipo UIC60 e é modelado através de elementos de viga Euler-Bernoulli;
- as palmilhas são modeladas através de elementos mola-amortecedor - modelo de Kelvin;
- as travessas, as camadas de balastro e sub-balastro e a camada superficial de fundação são modeladas através de elementos finitos de quatro nós em estado plano de tensão;
- o veículo é modelado através de uma massa suspensa (massa concentrada e elemento de mola-amortecedor), que representa um eixo completo do comboio *Eurostar*;
- para a interação roda-carril considerou-se o contacto elástico linear da teoria de Hertz;
- no programa ANSYS, o contacto roda-carril é definido através de um contacto do tipo ponto-linha e este é introduzido através do método da penalidade;
- a previsão da evolução do assentamento permanente da via considera apenas a contribuição da camada de balastro e é adotado o modelo de deformação permanente da camada de balastro proposto pela ORE (1970).

# 4

## AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA VIA BALASTRADA PERFEITA

### 4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, apresenta-se um estudo numérico para a avaliação do comportamento a curto e a longo prazo de uma via balastrada sujeita à passagem do comboio *Eurostar*. Este estudo tem como objetivo analisar a influência de vários fatores na previsão do assentamento permanente da camada de balastro. Trata-se de um assunto relevante dado que esta previsão pode condicionar o planeamento das ações de manutenção sobre a via. Como já foi referido no capítulo 2, a previsão da deformação permanente da camada de balastro depende de variáveis como: a tensão de desvio a que o material está sujeito, a porosidade da camada de balastro e o número de ciclos de carga.

Com este trabalho, pretende-se que o estudo da influência do período inicial de estabilização da camada de balastro, da porosidade da camada de balastro e da velocidade de circulação do veículo, demonstre o peso de cada fator na previsão da deformação permanente da camada de balastro.

Depois desta secção introdutória, na secção 4.2 do presente capítulo, faz-se a análise do comportamento estático da via relativamente ao deslocamento vertical do carril, à distribuição do deslocamento elástico da via pelos vários constituintes deformáveis da via (palmilha, balastro, sub-balastro e fundação) e ao nível de tensão nas camadas da via.

De seguida, na secção 4.3, apresenta-se a análise do comportamento dinâmico a curto prazo da via perfeita. Efetua-se, neste estudo, uma análise de sensibilidade da influência da velocidade de circulação do veículo na força de interação roda-carril, no deslocamento vertical da via e ainda na tensão vertical que se instala nas diferentes camadas da via. Refere-se, desde já, que a influência da velocidade foi analisada para: 100 km/h, 200 km/h, 250 km/h, 300 km/h e 350 km/h.

Na secção 4.4, analisa-se o comportamento dinâmico a longo prazo da via perfeita, através da realização de um estudo paramétrico, que considera como lei de deformação permanente da camada de balastro a apresentada pela ORE (1970). Esta parte do trabalho, tem-se como objetivo o estudo da influência da velocidade de circulação do veículo, da porosidade da camada de balastro e do período inicial de estabilização da camada de balastro na evolução do assentamento permanente da via. Neste estudo paramétrico definiu-se um caso base que servirá para posterior comparação com as análises dinâmicas efetuadas.

Por fim, na secção 4.5, apresentam-se as conclusões referentes a este capítulo.

## 4.2. COMPORTAMENTO ESTÁTICO DA VIA

Com a análise do comportamento estático da via pretendeu-se obter um maior conhecimento sobre o comportamento elástico da via férrea, em termos de deslocamentos e tensões nas camadas da via.

Assim, neste estudo apresenta-se a análise do deslocamento vertical da via e das tensões instaladas nas diferentes camadas da via quando se aplica uma carga estática de 170 kN, equivalente à carga por eixo do comboio de alta velocidade *Eurostar*. Refere-se que os resultados apresentados correspondem a duas posições: na travessa sob a carga aplicada e entre travessas.

### DESLOCAMENTO VERTICAL DO CARRIL

Na Fig. 4.1 apresenta-se a variação do deslocamento vertical do carril para a carga aplicada sobre uma travessa localizada a 36 m do início do modelo.

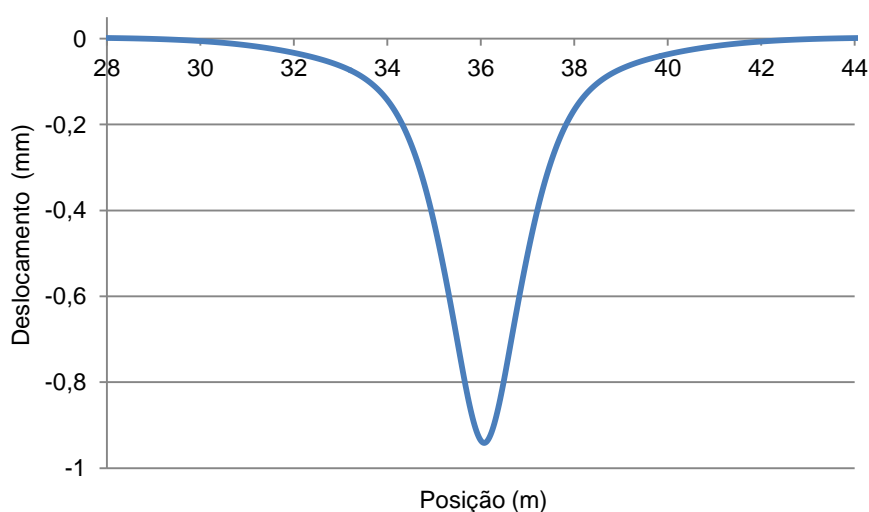


Fig. 4.1 – Deslocamento vertical do carril para a carga aplicada sobre uma travessa

A representação do deslocamento vertical do carril para a carga aplicada entre travessas é idêntica à apresentada na Fig. 4.1, variando apenas ligeiramente o valor do deslocamento vertical máximo registado. O valor do deslocamento vertical máximo do carril para a carga aplicada sobre uma travessa é de 0,942 mm e para a carga aplicada entre travessas é de 0,949 mm, valor ligeiramente superior, como seria de esperar.

Tendo por base os resultados obtidos, efetuou-se a análise da distribuição do deslocamento vertical pelos vários constituintes deformáveis da via balastrada (palmilhas, balastro, sub-balastro e fundação) que se apresentam na Fig. 4.2.

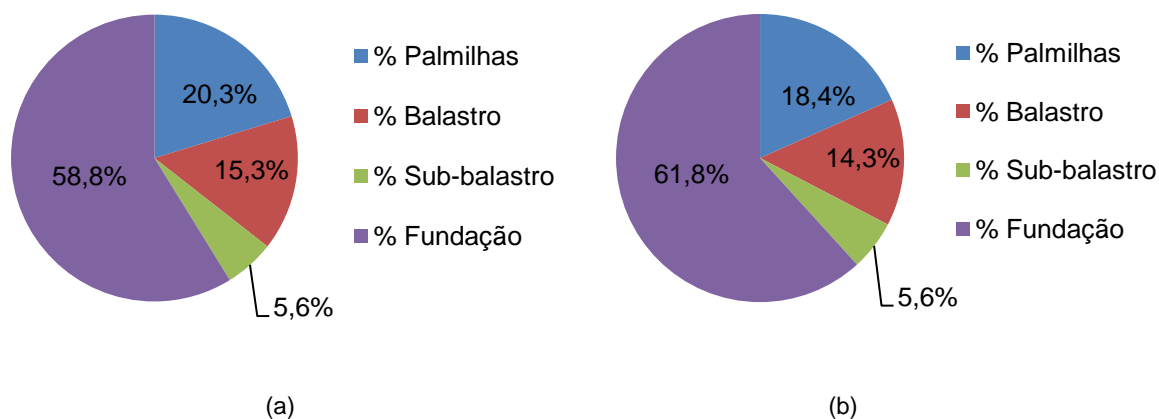


Fig. 4.2 – Distribuição do deslocamento vertical pelos constituintes deformáveis da via: (a) carga aplicada sobre uma travessa e (b) carga aplicada entre travessas

Quanto à distribuição dos deslocamentos para os dois casos de carga apresentados, verifica-se que a distribuição e a proporcionalidade são semelhantes.

A distribuição da carga estática pelas travessas adjacentes ao ponto de aplicação da carga nos casos em que a carga está aplicada sobre uma travessa e entre travessas está apresentada respetivamente na Fig. 4.3 e na Fig. 4.4.

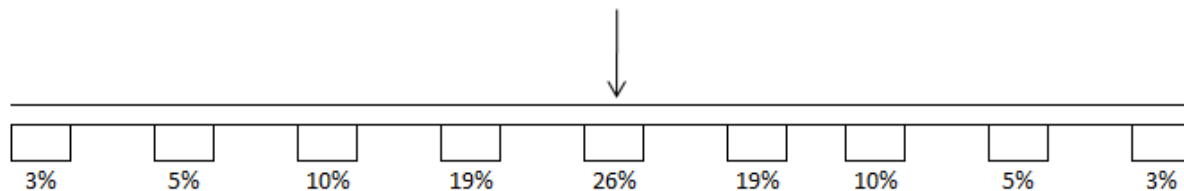


Fig. 4.3 – Distribuição da carga pelas travessas adjacentes ao ponto de aplicação. Carga sobre uma travessa

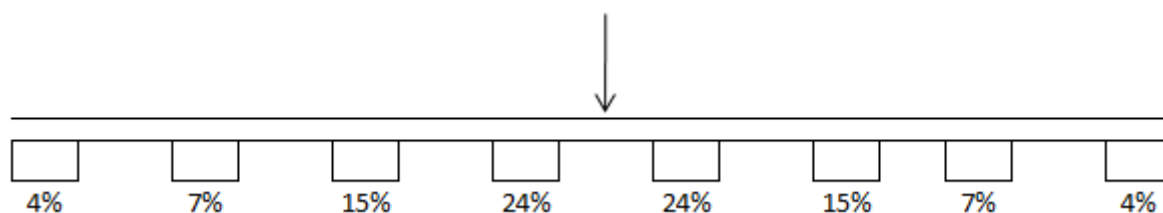


Fig. 4.4 – Distribuição da carga pelas travessas adjacentes ao ponto de aplicação. Carga entre travessas

Pelas Figuras, observa-se que para a via em estudo, a travessa sob a carga recebe cerca de 26% da carga aplicada (170 kN) e as duas travessas adjacentes cerca de 19%. Neste caso, uma parte considerável da carga aplicada é absorvida por estes três elementos. Considerando a carga aplicada entre travessas, verifica-se que o par de travessas adjacentes à zona de carregamento absorve cerca de 24% do valor da carga e o segundo par de travessas um valor mais reduzido, cerca de 15%, o que significa que estas quatro travessas recebem uma parte considerável da carga (78%).

## TENSÕES NAS CAMADAS DA VIA

Nesta secção, apresenta-se a análise da evolução das tensões nas camadas da via, nomeadamente a tensão vertical ( $\sigma_Y$ ), a tensão horizontal ( $\sigma_X$ ), a tensão tangencial ( $\tau_{XY}$ ) e a tensão de desvio.

A Fig. 4.5 representa um corte da malha de elementos finitos e os elementos onde se avaliaram os valores das tensões (sob uma travessa). Na malha adotada, a camada de balastro é composta por três camadas de elementos finitos e a camada de sub-balastro por duas camadas de elementos finitos. A camada de fundação é constituída por vinte camadas de elementos finitos, no entanto, em termos de resultados consideram-se apenas as duas primeiras camadas uma vez que a influência da carga nas tensões instaladas a esta profundidade reduz-se consideravelmente.

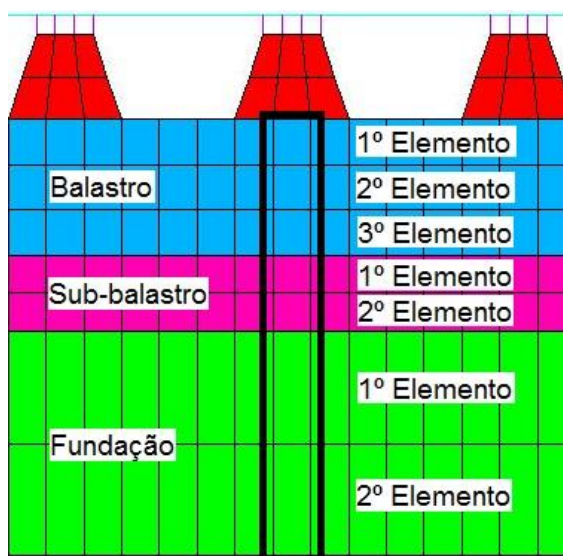


Fig. 4.5 – Representação de um corte da malha de elementos finitos

No Quadro 4.1 e no Quadro 4.2 apresentam-se respetivamente os valores da tensão  $\sigma_Y$ , da tensão  $\sigma_X$  e da tensão  $\tau_{XY}$ , para a carga sobre uma travessa e entre travessas.

Quadro 4.1 - Evolução das tensões em profundidade para carga aplicada sobre uma travessa

		Tensão $\sigma_Y$ (kPa)	Tensão $\sigma_X$ (kPa)	Tensão $\tau_{XY}$ (kPa)
Balastro	1º elemento	-59,9	-15,0	0,04
	2º elemento	-55,6	-13,9	0,06
	3º elemento	-47,2	-7,8	0,08
Sub-balastro	1º elemento	-36,7	-7,9	0,08
	2º elemento	-31,3	-4,3	0,07
Fundação	1º elemento	-25,8	-3,5	0,06
	2º elemento	-19,4	-1,5	0,04

Quadro 4.2 - Evolução das tensões em profundidade para carga aplicada entre travessas

		Tensão $\sigma_Y$ (kPa)	Tensão $\sigma_X$ (kPa)	Tensão $\tau_{XY}$ (kPa)
Balastro	1º elemento	-51,2	-13,1	-1,8
	2º elemento	-47,5	-12,9	-3,1
	3º elemento	-40,9	-8,2	-4,1
Sub-balastro	1º elemento	-32,4	-8,3	-4,1
	2º elemento	-28,0	-5,2	-3,9
Fundação	1º elemento	-23,6	-3,9	-3,4
	2º elemento	-18,1	-1,8	-2,5

Através da análise dos resultados, verifica-se que a tensão vertical decresce em profundidade. A tensão horizontal, que é dependente da tensão vertical, diminui igualmente em profundidade. No entanto, devido à mudança das características do solo e do confinamento lateral entre camadas, a tensão horizontal no 1º elemento da camada de sub-balastro é superior à tensão horizontal no 3º elemento da camada de balastro.

Verifica-se ainda que a tensão vertical e a horizontal são um pouco superiores para carga aplicada sobre uma travessa, comparativamente com o caso de a carga ser aplicada entre travessas. Relativamente à tensão tangencial, esta é praticamente nula para a carga aplicada sobre uma travessa, dado que a carga é aplicada no alinhamento vertical da coluna de elementos finitos considerados. No caso da carga aplicada entre travessas e uma vez que a carga é excêntrica ao alinhamento dos elementos finitos considerados, a tensão tangencial apresenta valores superiores, ainda que com pouca relevância relativamente aos valores das outras tensões.

O Quadro 4.3 e o Quadro 4.4 apresentam a evolução das tensões principais ( $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ , tensão principal máxima e tensão principal mínima, respetivamente) e das de desvio, em profundidade, para a carga aplicada sobre uma travessa e entre travessas. As tensões principais foram calculadas pelas equações 4.1 e 4.2, tendo por base as tensões normais ( $\sigma_X$  e  $\sigma_Y$ ) e tangenciais ( $\tau_{XY}$ ).

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_X + \sigma_Y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_Y - \sigma_X}{2}\right)^2 + \tau_{XY}^2} \quad (4.1)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_X + \sigma_Y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_Y - \sigma_X}{2}\right)^2 + \tau_{XY}^2} \quad (4.2)$$

sendo:  $\sigma_1$ , tensão principal máxima;  $\sigma_3$ , tensão principal mínima;  $\sigma_Y$ , tensão vertical;  $\sigma_X$ , tensão horizontal;  $\tau_{XY}$ , tensão tangencial. Refere-se que as tensões ( $\sigma_X$ ,  $\sigma_Y$  e  $\tau_{XY}$ ) em cada elemento resultam da média da tensão dos quatro vértices de cada elemento finito.

A tensão de desvio resulta da diferença entre a tensão principal máxima e a tensão principal mínima, ou seja, vale  $\sigma_1 - \sigma_3$ .

Quadro 4.3 - Evolução das tensões principais e de desvio em profundidade para carga aplicada sobre uma travessa

		Tensão $\sigma_1$ (kPa)	Tensão $\sigma_3$ (kPa)	Tensão desvio (kPa)
Balastro	1º elemento	-59,9	-15,0	-44,9
	2º elemento	-55,6	-13,9	-41,7
	3º elemento	-47,2	-7,8	-39,4
Sub-balastro	1º elemento	-36,7	-7,8	-28,9
	2º elemento	-31,3	-4,3	-26,9
Fundação	1º elemento	-25,8	-3,5	-22,3
	2º elemento	-19,4	-1,5	-17,9

Quadro 4.4 - Evolução das tensões principais e de desvio em profundidade para carga aplicada entre travessas

		Tensão $\sigma_1$ (kPa)	Tensão $\sigma_3$ (kPa)	Tensão desvio (kPa)
Balastro	1º elemento	-51,2	-13,0	-38,2
	2º elemento	-47,8	-12,7	-35,2
	3º elemento	-41,4	-7,7	-33,7
Sub-balastro	1º elemento	-33,0	-7,6	-25,5
	2º elemento	-28,6	-4,5	-24,1
Fundação	1º elemento	-24,1	-3,3	-20,8
	2º elemento	-18,5	-1,4	-17,1

Comparando os quadros 4.3 e 4.4 com 4.1 e 4.2, verifica-se que, uma vez que as tensões tangenciais são muito reduzidas, a tensão principal máxima coincide com a tensão vertical e a tensão principal mínima com a tensão horizontal. A tensão de desvio é um pouco superior para carga aplicada sobre uma travessa, comparativamente com o caso de a carga ser aplicada entre travessas, sendo a diferença menos notória à medida que aumenta a profundidade

#### 4.3. COMPORTAMENTO DINÂMICO A CURTO PRAZO DA VIA PERFEITA

Apresenta-se, nesta secção, o estudo do comportamento dinâmico da via perfeita quando solicitada pela passagem de um veículo a 300 km/h, analisando-se a força de interação roda-carril, o deslocamento vertical da roda, o deslocamento vertical da via, e as tensões verticais no balastro, sub-balastro e fundação (quando a carga dinâmica passa sobre uma travessa).

## FORÇA DE INTERAÇÃO RODA-CARRIL

A Fig. 4.6 representa a variação da força de interação roda-carril, para a velocidade de 300 km/h.

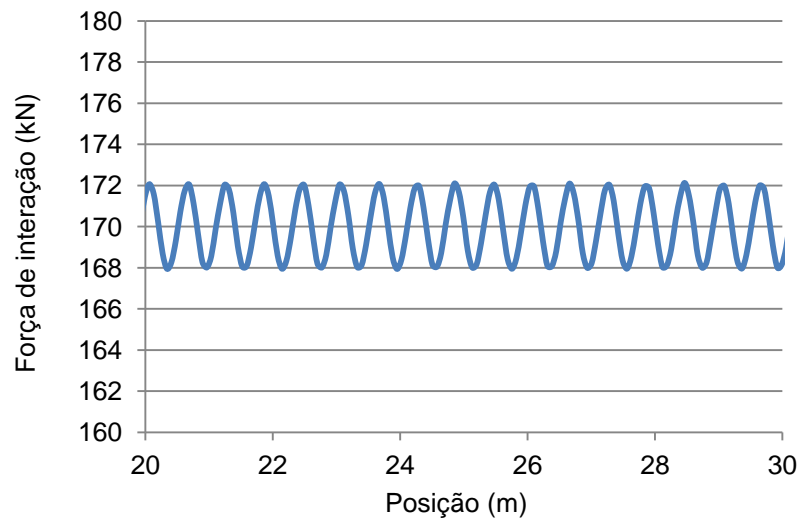


Fig. 4.6 – Força de interação roda-carril para a velocidade de 300 km/h ( $E=80$  MPa)

Da análise da figura, verifica-se que a força de interação roda-carril é de aproximadamente 172 kN e 168 kN, respetivamente, valor máximo e valor mínimo.

## DESLOCAMENTO VERTICAL DA VIA

Na Fig. 4.7, apresenta-se o registo temporal do deslocamento vertical da via (sobre uma travessa) para a velocidade de 300 km/h em conjunto com a posição vertical da roda.

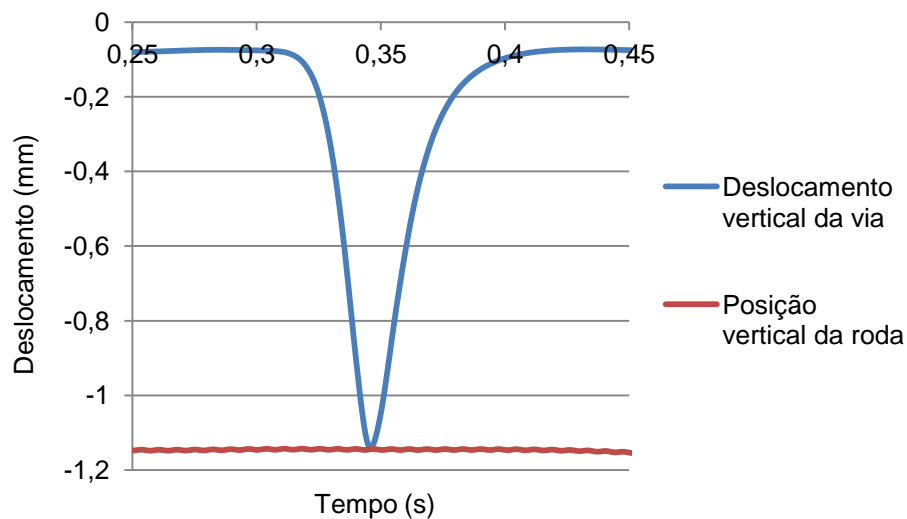


Fig. 4.7 – Deslocamento vertical da via e posição da roda para a velocidade de 300 km/h ( $E=80$  MPa)



Para a velocidade de circulação de 300 km/h, o deslocamento máximo da via é de 1,13 mm. De referir ainda, que a posição da roda coincide com o deslocamento vertical da via dado não haver perda de contacto.

#### TENSÃO VERTICAL NAS CAMADAS DA VIA

Nesta secção analisa-se a influência da velocidade de circulação do veículo na variação da tensão vertical ( $\sigma_v$ ) nas diferentes camadas da via. A designação dos elementos, nas figuras abaixo apresentadas, é igual à apresentada em 4.2.

Na Fig. 4.8, apresenta-se o registo temporal da tensão vertical, em cada camada de elementos finitos da camada de balastro, para a velocidade de 300 km/h e na Fig. 4.9, apresenta-se o registo temporal da tensão vertical, nas duas camadas de elementos finitos da camada de sub-balastro, para a mesma velocidade de circulação. De seguida, na Fig. 4.10, apresenta-se o registo temporal da tensão vertical, nas duas primeiras camadas de elementos finitos da fundação, para a velocidade de 300 km/h.

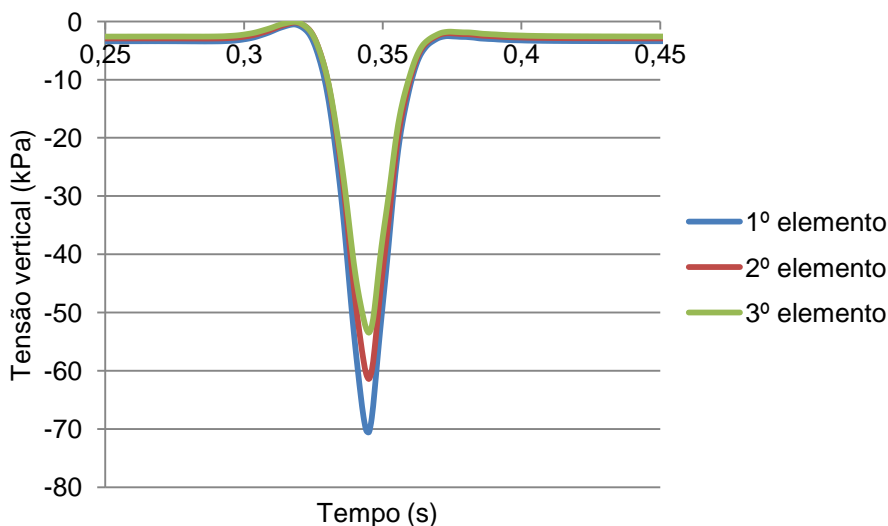


Fig. 4.8 – Tensão vertical na camada de balastro para a velocidade de 300 km/h ( $E=80$  MPa)

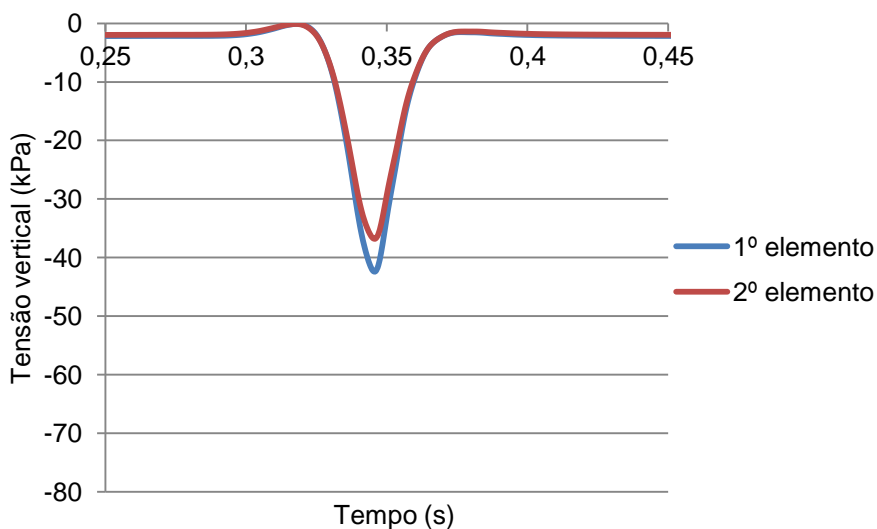


Fig. 4.9 - Tensão vertical na camada de sub-balastro para a velocidade de 300 km/h ( $E=80$  MPa)

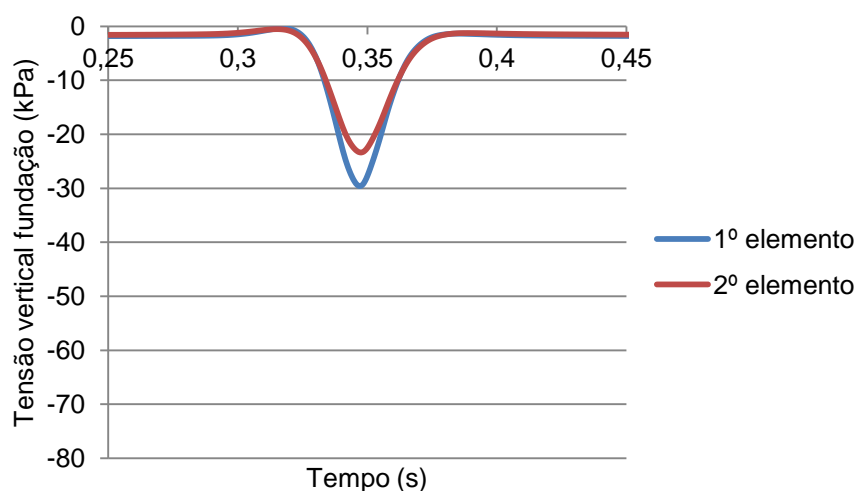


Fig. 4.10 - Tensão vertical na camada de fundação para a velocidade de 300 km/h ( $E=80$  MPa)

Analisando as Fig. 4.8, a Fig. 4.10, e conforme o verificado na análise da carga estática, verifica-se que a tensão vertical decresce igualmente em profundidade. Por exemplo, o valor máximo obtido na camada de balastro é de 70,5 kPa, na de sub-balastro, de 42,4 kPa e na fundação, de 29,6 kPa.

Ainda nesta tese, avaliou-se a influência da velocidade de circulação do veículo no comportamento da via perfeita através da variação da velocidade, entre 100 e 350 km/h, tendo-se considerado cinco velocidades: 100 km/h, 200 km/h, 250 km/h, 300 km/h e 350 km/h. Nestes cálculos considerou-se o módulo de deformabilidade da fundação de 300 MPa. De forma a minimizar tempos de cálculo, nesta análise não foi considerada a interação travessa-balastro pelo que não foi necessário considerar o efeito da gravidade na parte superior do modelo (carril e travessas).

#### FORÇA DE INTERAÇÃO RODA-CARRIL

Os valores máximo e mínimo da força de interação roda-carril, para as diferentes velocidades de circulação, estão indicados no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Força de interação roda-carril para diferentes velocidades de circulação ( $E=300$  MPa)

Força de interação (kN)	100 km/h	200 km/h	250 km/h	300 km/h	350 km/h
Máximo	171	172	172	172	173
Mínimo	169	168	168	168	167

Através da análise dos resultados, verifica-se que com o aumento da velocidade o valor máximo da força de interação roda-carril aumenta e que o valor mínimo diminui, ou seja, a amplitude da força de interação aumenta com o aumento da velocidade. No entanto, por tratar-se de via perfeita, este aumento da força de interação é quase desprezável, visto que um aumento de 250% da velocidade de circulação corresponde apenas a um aumento de pouco mais de 1% da força de interação. Verifica-se ainda, que a força de interação varia, como seria de esperar em via perfeita, em torno dos 170 kN, valor da carga estática por eixo.

O Quadro 4.6 indica o valor da frequência de excitação registada na força de interação roda-carril para diferentes velocidades de circulação do veículo.

Quadro 4.6 - Frequência de excitação para diferentes velocidades de circulação (E=300 MPa)

	100 km/h	200 km/h	250 km/h	300 km/h	350 km/h
Frequência de excitação (Hz)	46,3	92,6	115,7	138,9	162,0

Por se tratar de via perfeita, “a excitação dinâmica resulta do movimento do comboio sobre a via deformada em consequência da circulação do veículo sobre o carril apoiado de modo discreto”, como referido em Vale (2010). A excitação dinâmica é assim consequência da circulação do veículo sobre o carril apoiado de modo discreto nas travessas, sendo a frequência de excitação obtida através da equação 4.3.

$$f = V/e \quad (4.3)$$

onde: f, frequência; V, velocidade; e, espaçamento entre travessas.

Para uma melhor interpretação da influência da velocidade de interação dinâmica quer em termos de magnitude, quer em termos de frequência, na Fig. 4.11 representa-se a variação da força de interação roda-carril, para as duas velocidades extremas consideradas (100 e 350 km/h).

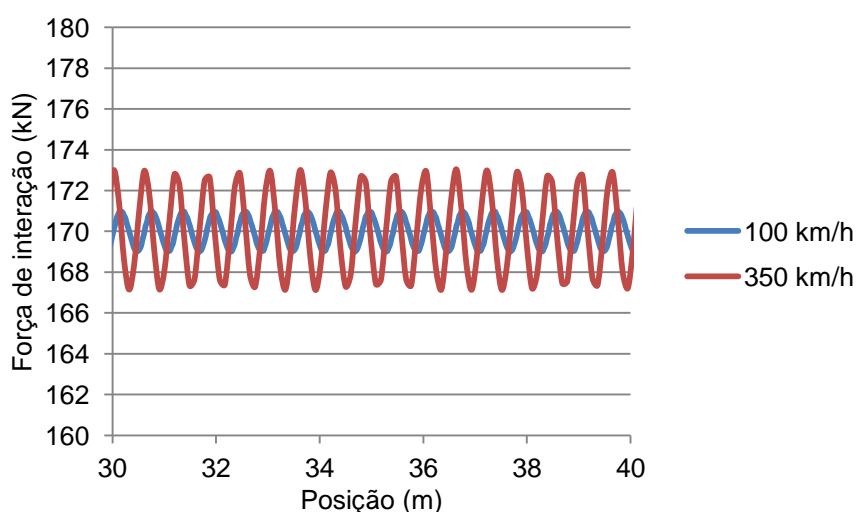


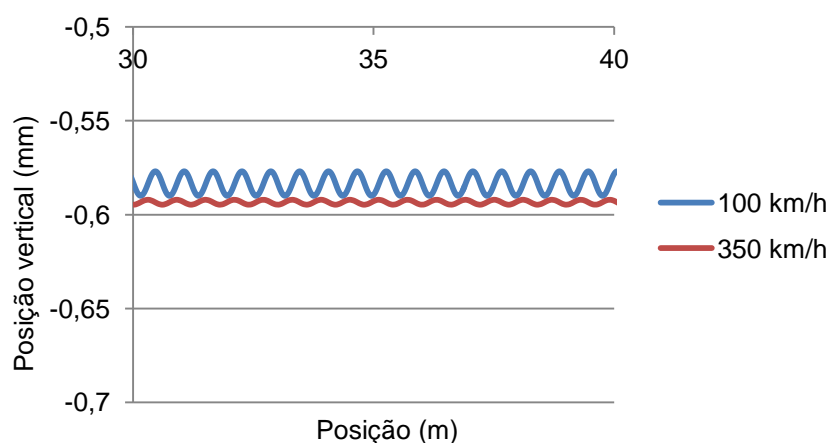
Fig. 4.11 – Variação da força de interação roda-carril para a velocidade de 100 e 350 km/h (E=300 MPa)

#### DESLOCAMENTO VERTICAL DA VIA

No Quadro 4.7 apresenta-se os valores máximo e mínimo do deslocamento vertical da via, para as cinco velocidades de circulação e na Fig. 4.12 mostra-se a posição vertical da roda, para a maior e a menor velocidade analisada, 350 km/h e 100 km/h, respetivamente.

Quadro 4.7 - Deslocamento vertical dinâmico máximo e mínimo da via para as diferentes velocidades de circulação ( $E=300$  MPa)

Deslocamento (mm)	100 km/h	200 km/h	250 km/h	300 km/h	350 km/h
Máximo	-0,590	-0,590	-0,590	-0,592	-0,595
Mínimo	-0,577	-0,583	-0,586	-0,589	-0,592

Fig. 4.12 - Posição vertical da roda ao longo da via para velocidade de 100 km/h e 350 km/h ( $E=300$  MPa)

Analisando os resultados no Quadro 4.7, verifica-se que o aumento da velocidade implica um aumento do deslocamento da via, mas uma diminuição da amplitude do deslocamento, ou seja, com o aumento da velocidade há um aumento da variação da gama de deslocamento. É importante referir que, como se mostra no Quadro 4.7, estas variações são muito reduzidas, da ordem de 1 a 2%. Tal como acontece com a força de interação, a variação cíclica da posição da roda (Fig. 4.12) deve-se à excitação provocada pela circulação do veículo sobre o carril apoiado de modo discreto nas travessas.

#### TENSÃO VERTICAL NAS CAMADAS DA VIA

Para analisar-se a influência da velocidade, no Quadro 4.8 apresenta-se a evolução da tensão vertical em profundidade, para as várias velocidades de circulação.

Quadro 4.8 – Tensão vertical nas camadas da via para as várias velocidades de circulação (E=300 MPa)

		Tensão $\sigma_y$ (kPa)				
		100 km/h	200 km/h	250 km/h	300 km/h	350 km/h
Balastro	1º Elemento	-64,1	-66,1	-66,5	-67,1	-67,6
	2º Elemento	-61,5	-63,9	-64,5	-65,4	-65,9
	3º Elemento	-52,1	-54,5	-55,1	-56,1	-57,0
	Média	-59,2	-61,5	-62,0	-62,9	-63,5
Sub-balastro	1º Elemento	-41,0	-42,6	-43,0	-43,7	-44,2
	2º Elemento	-35,3	-36,8	-37,2	-37,8	-38,4
	Média	-38,1	-39,7	-40,1	-40,8	-41,3
Fundação	1º Elemento	-29,0	-29,4	-29,4	-29,4	-29,6
	2º Elemento	-21,8	-22,2	-22,3	-22,5	-22,6

Analisando os resultados, verifica-se que o aumento da velocidade implica um aumento da tensão vertical, em todas as camadas de elementos finitos analisadas. No entanto, e à semelhança do ocorrido com a variação da carga dinâmica (razão pela qual a tensão vertical varia), este aumento é muito reduzido como se constata pela observação do Quadro 4.9 que mostra a variação percentual da tensão vertical, entre a velocidade de 100 km/h e 350 km/h.

Quadro 4.9 – Variação da tensão vertical entre a velocidade de 100 km/h e 350 km/h (E=300 MPa)

		Variação tensão vertical (%)
Balastro	1º Elemento	5,4
	2º Elemento	7,0
	3º Elemento	9,4
Sub-balastro	1º Elemento	7,8
	2º Elemento	8,9
Fundação	1º Elemento	2,0
	2º Elemento	4,0

Analisando a influência do módulo de deformabilidade da fundação no comportamento dinâmico da via, comparando os resultados obtidos para o módulo de deformabilidade da fundação de 80 MPa e 300 MPa (para 300 km/h), verifica-se que: a força de interação roda-carril é igual nos dois casos considerados; o deslocamento vertical da via é aproximadamente metade, considerando o módulo de deformabilidade da fundação de 300 MPa em vez de 80 MPa; a tensão vertical das camadas da via é aproximadamente igual nos dois casos considerados.

#### 4.4. COMPORTAMENTO DINÂMICO A LONGO PRAZO DA VIA PERFEITA

A análise do comportamento da via a longo prazo tem como principal objetivo avaliar a influência de alguns parâmetros na evolução da qualidade geométrica de vias balastradas.

Uma vez que o assentamento da camada de balastro representa a parcela mais significativa do assentamento global da via (Alves Ribeiro 2012), neste caso de estudo, a previsão da evolução do assentamento permanente da via foi realizada considerando apenas a contribuição da camada de balastro tendo por base a lei de deformação proposta pela ORE (1970).

Neste estudo, teve-se em conta os aspetos a seguir indicadas, tal como Alves Ribeiro (2012) considerou:

- i. no início do processo de deformação permanente a via encontra-se em perfeitas condições, não existindo nenhum defeito geométrico;
- ii. admite-se que todos os eixos apresentam as mesmas características, ou seja, não se efetua distinção entre o tipo de comboio;
- iii. assume-se que os eixos circulam sempre à mesma velocidade;
- iv. considera-se a deformação permanente devida ao incremento de tensão provocado pela passagem dos eixos, desprezando-se o contributo das tensões geostáticas;
- v. considera-se como incremento do processo de deformação permanente um conjunto de 100000 ciclos de carga.
- vi. as características de amortecimento e de rigidez dos materiais não são atualizadas ao longo da deformação da via.

##### 4.4.1. CASO BASE

O “caso base” considera: velocidade de circulação do veículo igual a 300 km/h; porosidade da camada de balastro igual a 0,40 e período inicial de estabilização da camada de balastro equivalente a 100000 ciclos de carga.

##### 4.4.1.1. Nível de tensão e deformação

Conforme apresentado em 2.6, a lei de deformação permanente dos materiais da via utilizada neste estudo, tem por base a consideração do nível de tensão nos elementos finitos do modelo devido à passagem dos eixos do veículo, através da tensão de desvio, daí analisar-se nesta parte do trabalho a evolução da tensão de desvio na camada de balastro ao longo da via, para cada ciclo de carga.

Assim, na Fig. 4.13, apresenta-se a evolução da tensão de desvio na camada de balastro ao longo da via com o aumento do número de ciclos de carga. Note-se que os pontos representados no gráfico correspondem ao valor médio da tensão de desvio sob cada travessa.

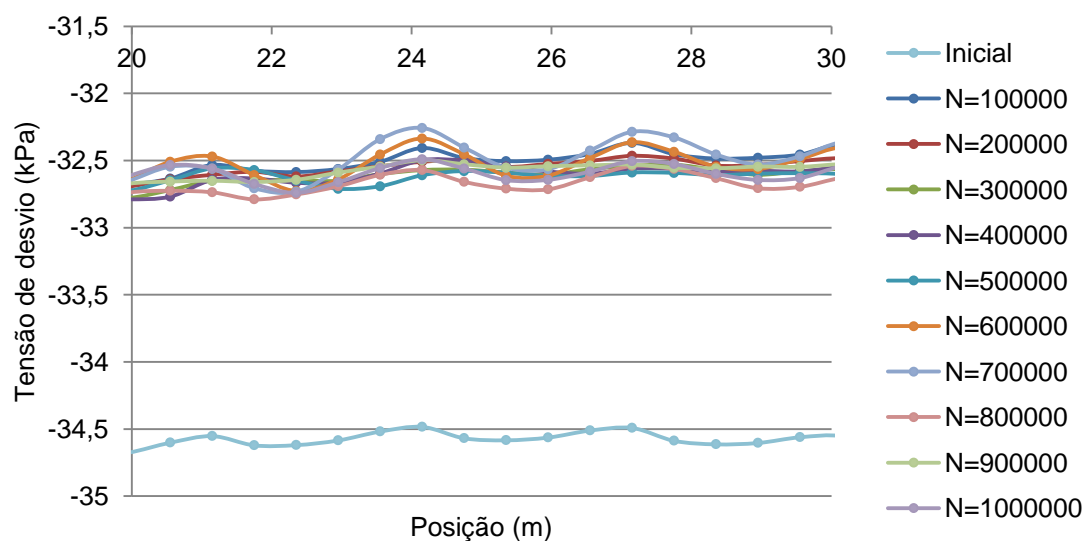


Fig. 4.13 – Evolução da tensão de desvio ao longo da via na camada de balastro, em função do número de ciclos de carga

Considerando os valores máximos obtidos na camada de balastro, elaborou-se a Fig. 4.14 que apresenta a evolução da tensão de desvio da camada de balastro sob uma travessa, com o aumento do número de ciclos de carga.

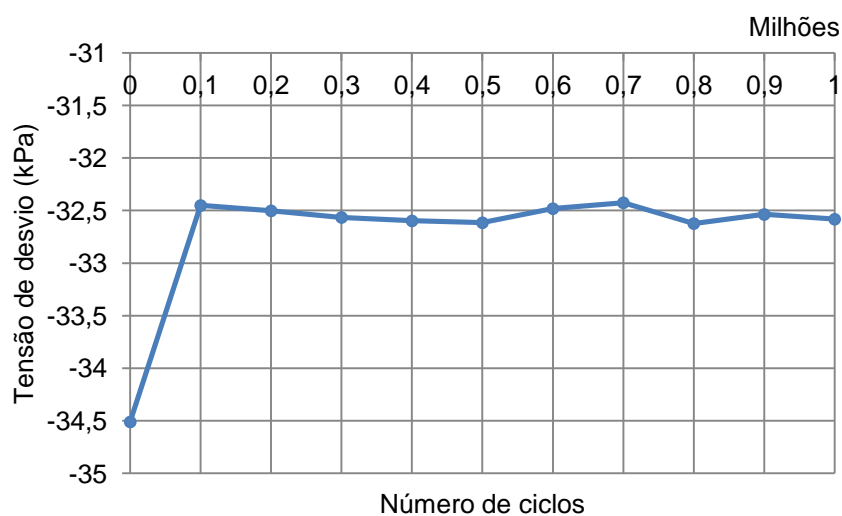


Fig. 4.14 – Evolução da tensão de desvio na camada de balastro no alinhamento vertical de uma travessa, em função do número de ciclos de carga

Verifica-se, pela Fig. 4.14, que a evolução da tensão de desvio se mantém praticamente constante com o aumento do número de ciclos de carga.

Apresenta-se na Fig. 4.15, a evolução da deformação permanente dos elementos finitos sob uma travessa, com o aumento do número de ciclos de carga.

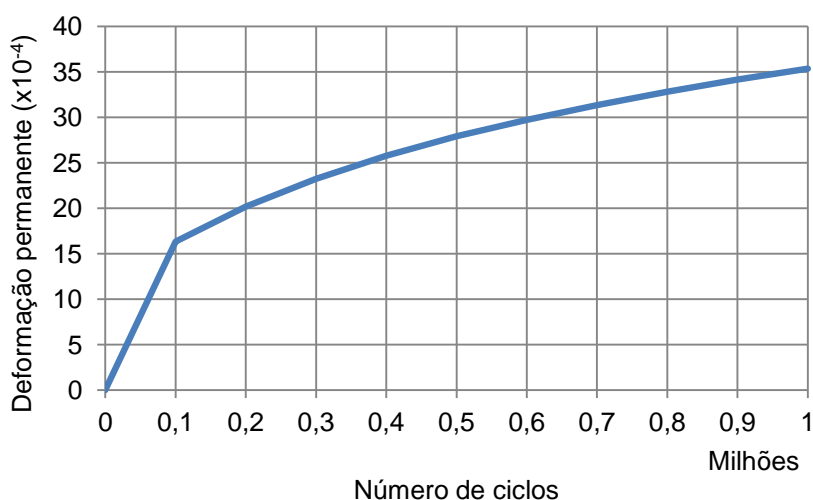


Fig. 4.15 – Evolução da deformação permanente no topo da camada de balastro, em função do número de ciclos de carga

Analisando os resultados, verifica-se que a taxa de crescimento da deformação permanente se reduz com o aumento do número de ciclos de carga. A deformação permanente da camada de balastro nos primeiros 500000 ciclos de carga é de cerca de  $28 \times 10^{-4}$ , enquanto nos restantes 500000 ciclos de carga é de cerca de apenas  $7 \times 10^{-4}$ .

#### 4.4.1.2. Resultados da análise dinâmica

Começa por analisar-se o assentamento no topo da camada de balastro. A Fig. 4.16 apresenta esse assentamento, ao longo da via perfeita, com o aumento do número de ciclos de carga. Os pontos representados no gráfico correspondem ao valor do assentamento obtido no alinhamento vertical de cada travessa. Como se pode ver, pelo facto da via ser perfeita, o assentamento permanente da camada de balastro é constante ao longo da via.



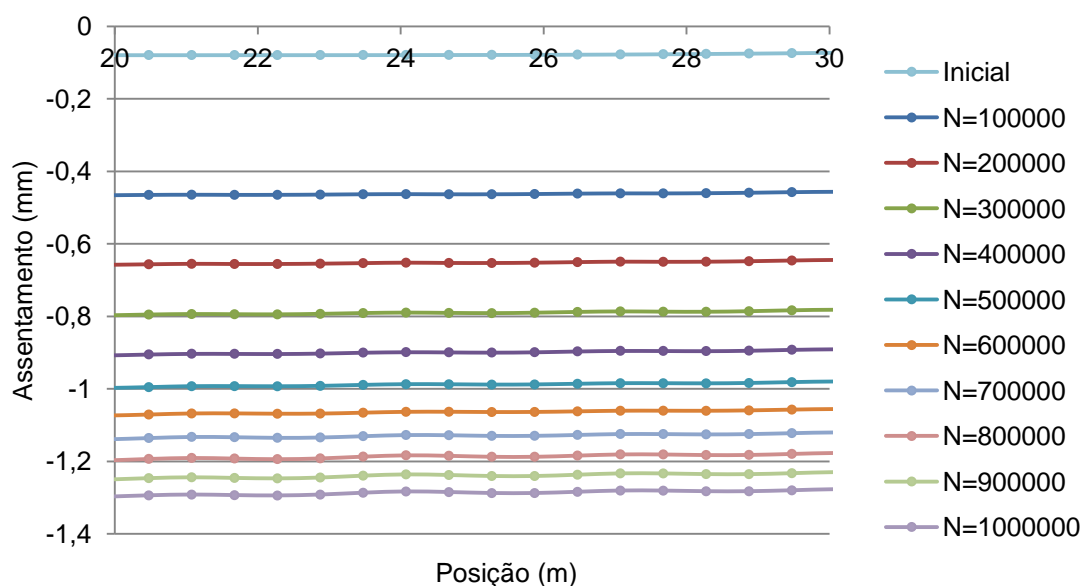


Fig. 4.16 – Assentamento no topo da camada de balastro ao longo da via, em função do número de ciclos de carga

Na Fig. 4.17, representa-se a evolução do assentamento no topo da camada de balastro e na base de uma travessa, com o aumento do número de ciclos de carga. A evolução das duas curvas permite analisar eventuais perdas de contacto entre a base da travessa e o topo da camada de balastro. É de referir que a realização desta análise é possível uma vez que foi considerado no modelo o contacto travessa-balastro.

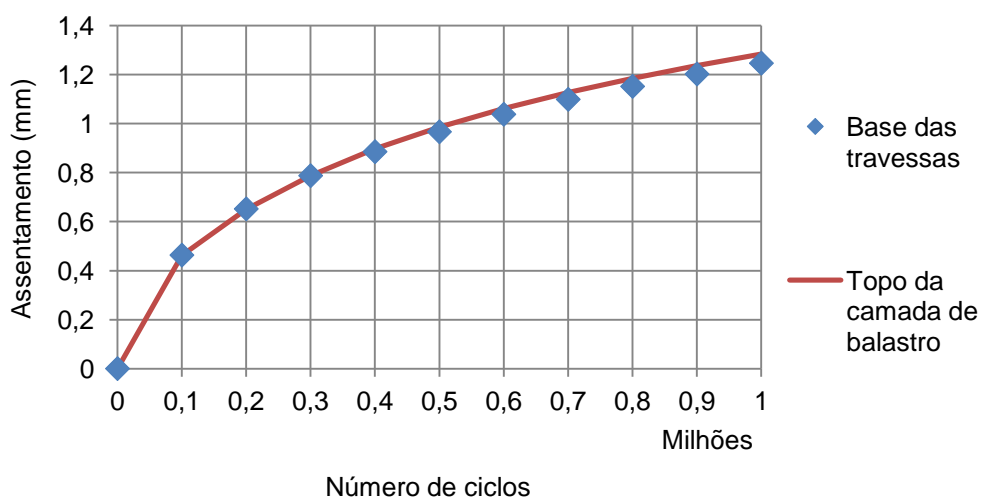


Fig. 4.17 – Evolução do assentamento no topo da camada de balastro e na base de uma travessa, em função do número de ciclos de carga

Observando esta figura, verifica-se que o contacto travessa-balastro se mantém ao longo dos ciclos de carga.

Passa-se para a análise da força de interação travessa-balastro. A Fig. 4.18 representa a evolução da força de interação travessa-balastro, com o aumento do número de ciclos de carga para uma travessa da via. Os pontos representados no gráfico correspondem ao valor máximo da força de interação da travessa em cada ciclo de carga.

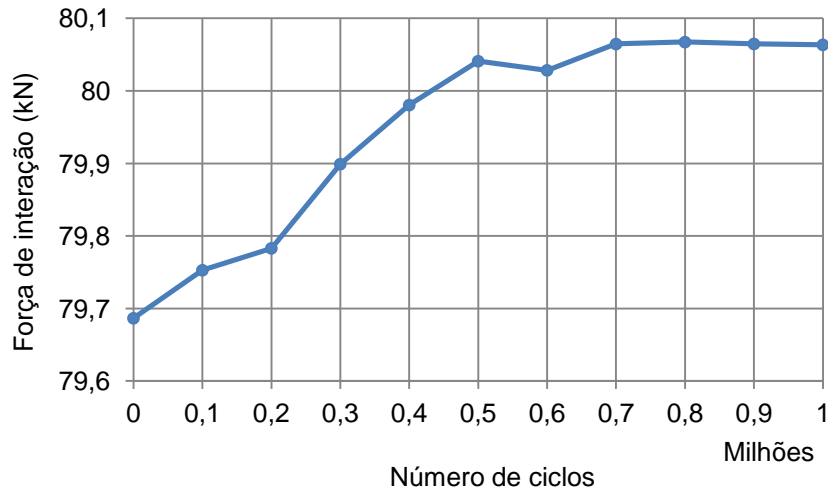


Fig. 4.18 - Evolução do valor máximo da força de interação travessa-balastro, em função do número de ciclos de carga

Pela Fig. 4.18, verifica-se que a força de interação aumenta um pouco nos primeiros 500000 ciclos de carregamento, mantendo-se aproximadamente constante nos restantes ciclos.

Analisando agora a roda, a Fig. 4.19 representa a posição vertical da roda ao circular ao longo da via, com o aumento do número de ciclos de carga.

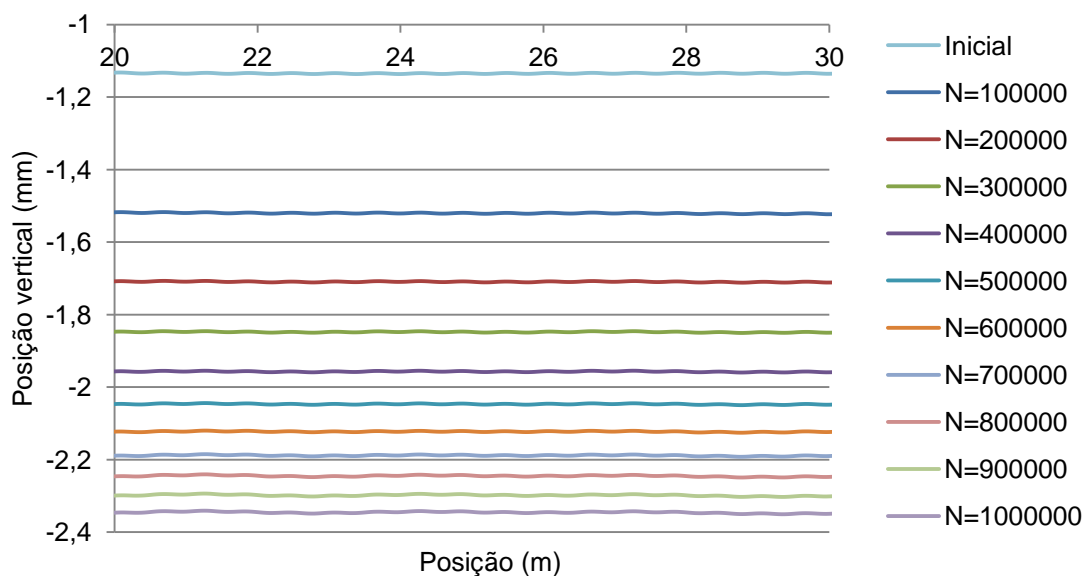


Fig. 4.19 – Posição vertical da roda, ao longo da via, em função do número de ciclos de carga

A evolução do deslocamento vertical da via com o aumento do número de ciclos de carga está indicada na Fig. 4.20.

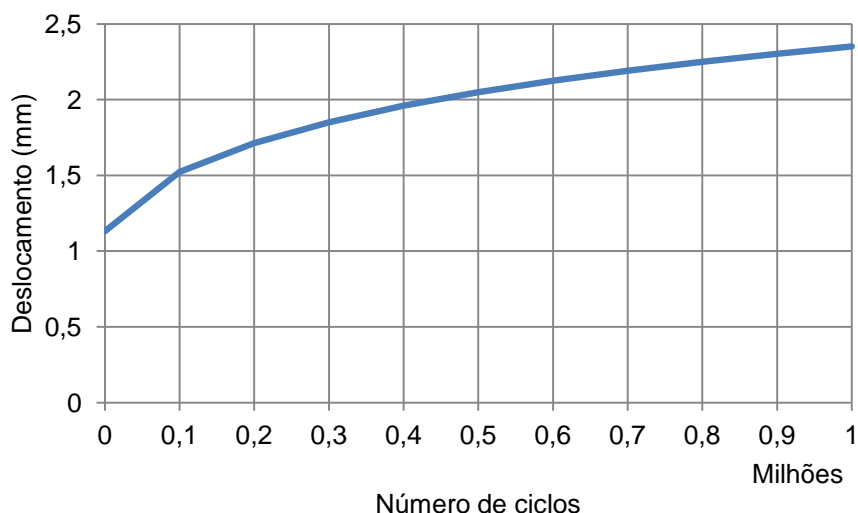


Fig. 4.20 – Evolução do deslocamento vertical da via, em função do número de ciclos de carga

Verifica-se, pela Fig. 4.20, que o aumento do número de ciclos de carga provoca um aumento do deslocamento vertical da via. Na primeira fase de carregamento o deslocamento vertical da roda é de 1,13 mm e na última fase de 2,35 mm. Verifica-se ainda que o incremento de deslocamento vertical da via decresce com o aumento do número de ciclos de carga. Pelo facto de não existir perda de contacto entre a roda e a via, a posição da roda (Fig. 4.19) coincide com o deslocamento vertical da via (Fig. 4.20) em cada ciclo de carga.

Passa-se à análise da força de interação roda-carril. Na Fig. 4.21 são indicados o valor máximo e o valor mínimo da força de interação roda-carril, com o aumento do número de ciclos de carga.

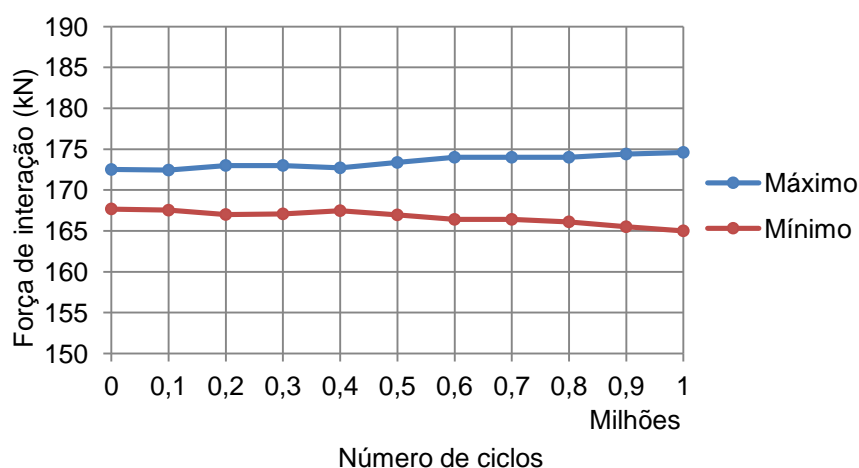


Fig. 4.21 – Evolução dos valores máximo e mínimo da força de interação roda-carril, em função do número de ciclos de carga

Analisando os resultados, verifica-se que a força de interação roda-carril varia em torno dos 170 kN, o valor da carga estática por eixo.

Verifica-se ainda, que o aumento do número de ciclos de carga provoca um aumento pouco significativo da força de interação roda-carril.

Na Fig. 4.22, apresenta-se o registo temporal da aceleração vertical de uma travessa na fase inicial e ao fim de 1 milhão de ciclos de carga. Os valores máximos registam-se quando a roda passa sobre a travessa em causa.

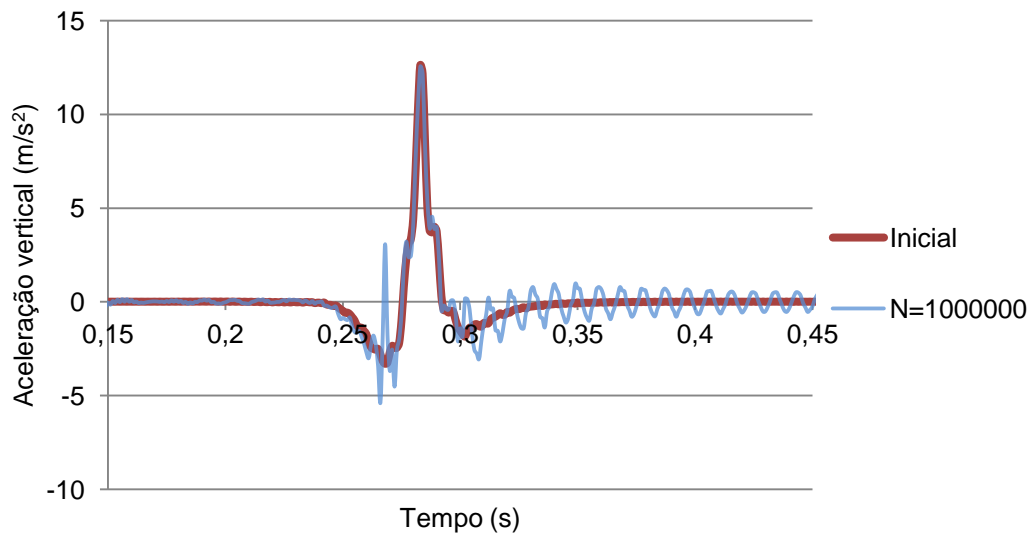


Fig. 4.22 – Registo temporal da aceleração vertical de uma travessa para diferentes ciclos de carregamento

Observando a Fig. 4.22, nota-se que a aceleração mínima aumenta à medida que a roda se aproxima da travessa, sendo a aceleração máxima registada quando a roda passa sobre a mesma. Após a passagem da roda sobre a travessa, esta fica a vibrar, como se verifica na parte final do registo temporal.

Na Fig. 4.23, apresenta-se a evolução da aceleração vertical máxima e mínima, com o aumento do número de ciclos de carga.

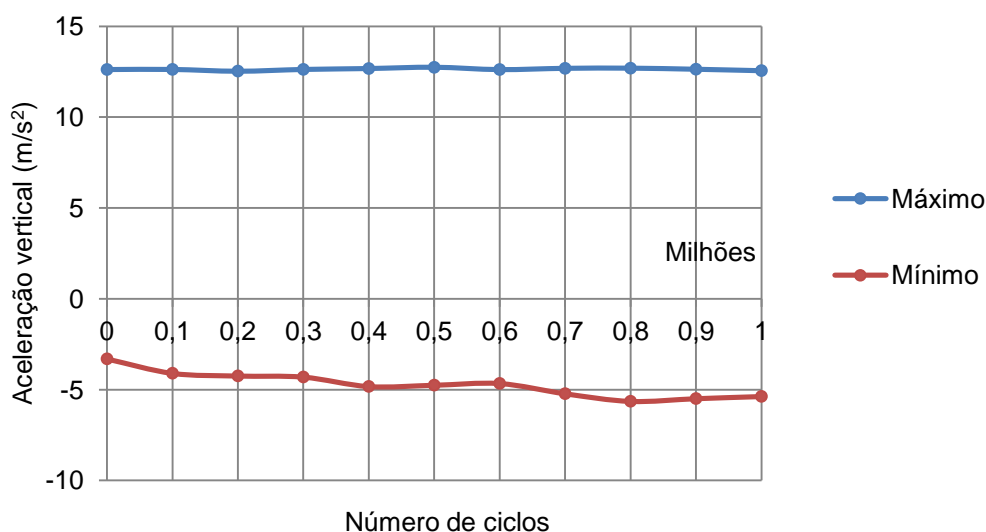


Fig. 4.23 - Aceleração vertical de uma travessa, em função do número de ciclos de carga

Observando a figura, verifica-se ainda que o aumento do número de ciclos de carga não têm qualquer influência nos valores extremos da aceleração vertical, uma vez que está é praticamente constante.

#### 4.4.2. INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CIRCULAÇÃO DO VEÍCULO

Para avaliar a influência da velocidade de circulação, comparam-se os resultados obtidos com velocidade igual a 200 km/h com os de 300 km/h. Neste estudo, porosidade da camada de balastro de mantém-se 0,40 e o período inicial de estabilização da camada de balastro também é de 100000 ciclos.

##### 4.4.2.1. Nível de tensão e deformação da via

Na Fig. 4.24, representa-se a evolução da tensão de desvio na camada de balastro para as velocidades de circulação de 300 km/h e de 200 km/h, em função do número de ciclos de carga e, na Fig. 4.25, representa-se a evolução da deformação permanente da camada de balastro para a velocidade de circulação de 300 km/h e de 200 km/h, em função do número de ciclos de carga.

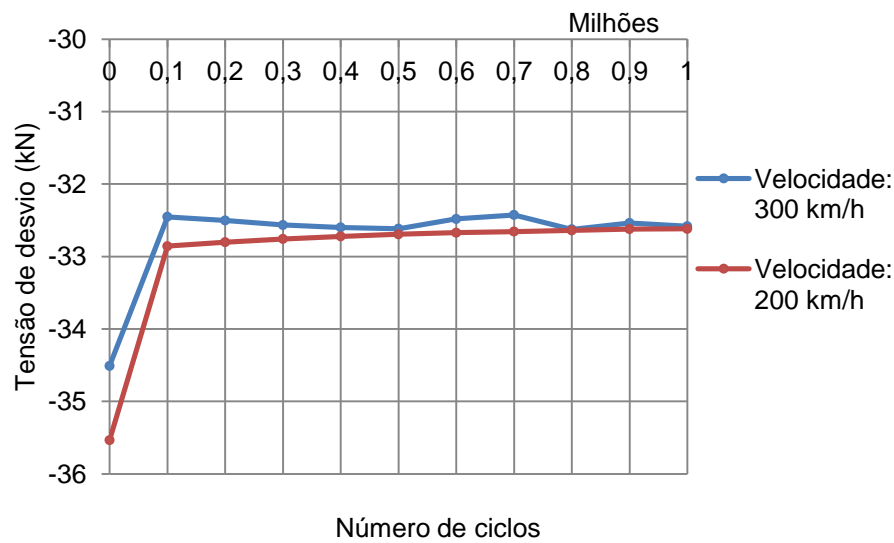


Fig. 4.24 – Evolução da tensão de desvio na camada de balastro para a velocidade de circulação de 300 km/h e de 200 km/h, em função do número de ciclos de carga

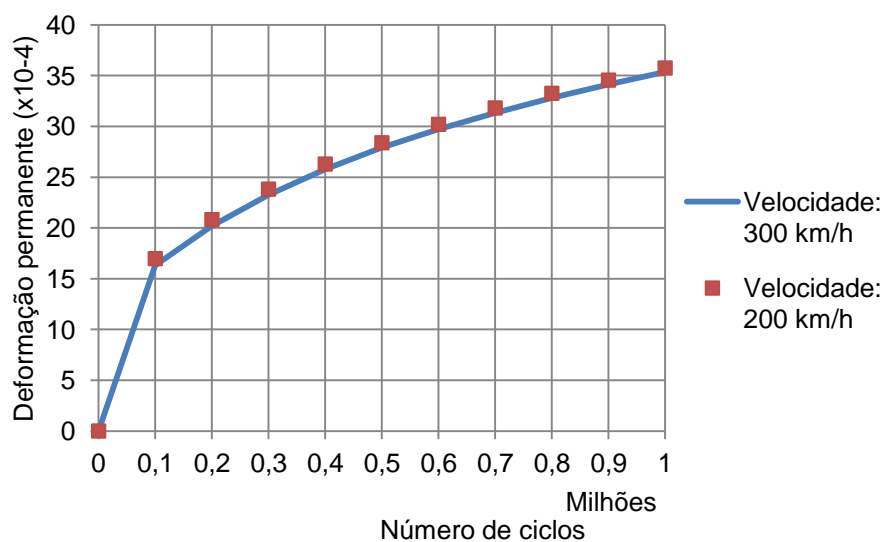


Fig. 4.25 – Evolução da deformação permanente da camada de balastro para a velocidade de circulação de 300 km/h e de 200 km/h, em função do número de ciclos de carga

A análise dos resultados permite verificar que a tensão de desvio apresenta uma evolução semelhante relativamente à forma e à grandeza, para as duas velocidades de circulação.

Note-se que a tensão de desvio é um dado de entrada para a estimativa da evolução da deformação. Assim, e tendo em conta que a mesma apresenta valores muito próximos ao longo do número de ciclos de carga, a evolução da deformação da camada de balastro terá de ser obrigatoriamente concordante para as duas velocidades de circulação, aspeto verificado pela análise do gráfico da evolução da deformação permanente, apresentada na Fig. 4.25.

#### 4.4.2.2. Resultados da análise dinâmica

Na Fig. 4.26 representa-se a evolução do assentamento da camada de balastro para a velocidade de circulação de 300 km/h e de 200 km/h, em função do número de ciclos de carga.

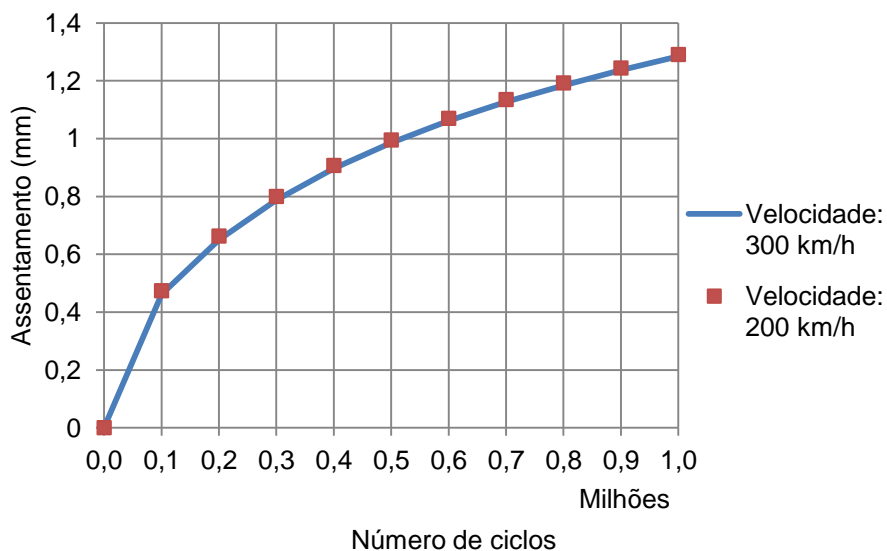


Fig. 4.26 – Evolução do assentamento da camada de balastro para a velocidade de circulação de 300 km/h e de 200 km/h, em função do número de ciclos de carga

Analisando Fig. 4.26, verifica-se que a evolução do assentamento da camada de balastro praticamente coincide para as duas velocidades de circulação.

A Fig. 4.27 representa a evolução do assentamento no topo da camada de balastro e na base de uma travessa para a velocidade de 200 km/h, com o aumento do número de ciclos de carga. A evolução das duas curvas permite analisar eventuais perdas de contacto entre a base da travessa e o topo da camada de balastro. Esta comparação permite verificar que o contacto travessa-balastro se mantém ao longo dos ciclos de carga.

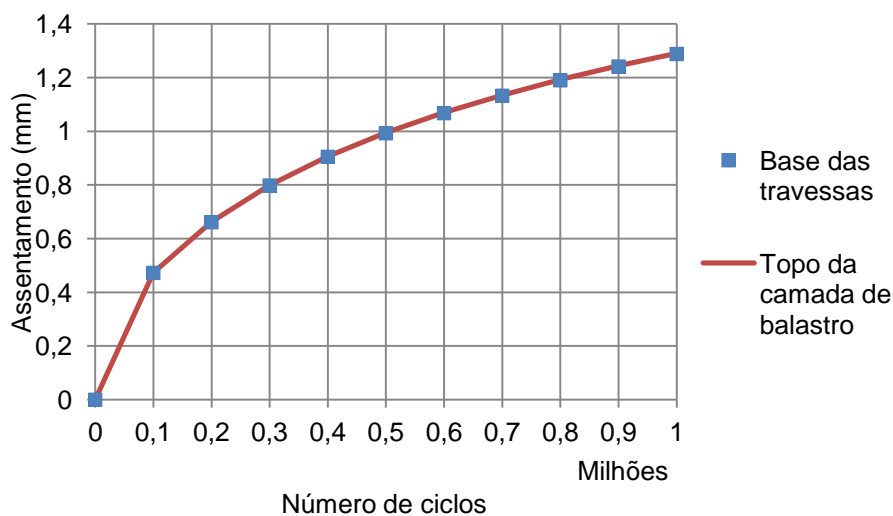


Fig. 4.27 – Evolução do assentamento na base de uma travessa e no topo da camada de balastro para a velocidade de 200 km/h, em função do número de ciclos de carga

A Fig. 4.28 apresenta a evolução da força de interação travessa-balastro para a velocidade de circulação de 300 km/h e de 200 km/h, com o aumento do número de ciclos de carga.

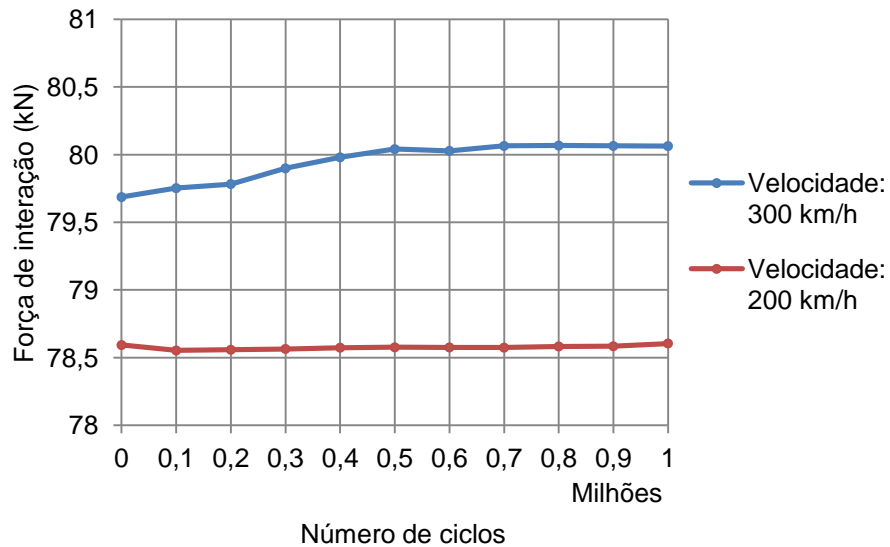


Fig. 4.28 – Evolução da força de interação travessa-balastro para a velocidade de circulação de 300 km/h e de 200 km/h, em função do número de ciclos de carga

Analisando os resultados, verifica-se que a força de interação travessa-balastro diminui com a diminuição da velocidade, no entanto a diferença é diminuta, uma vez que para 1 milhão de ciclos considerando a velocidade de 300 km/h, a força de interação é de 80,1 kN e considerando a velocidade de 200 km/h de 78,6 kN, portanto uma diferença percentual de 2%.

A Fig. 4.29 apresenta a evolução do deslocamento vertical da via para a velocidade de circulação de 300 km/h e de 200 km/h, com o aumento do número de ciclos de carga.

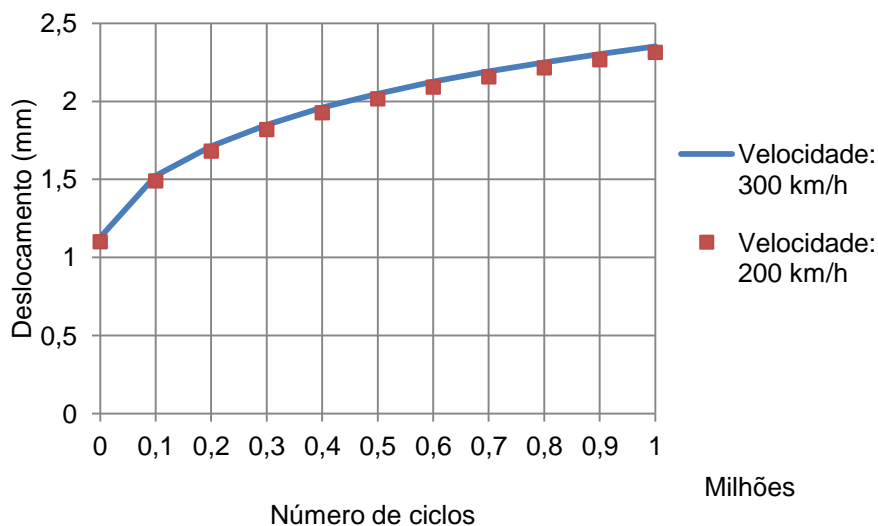


Fig. 4.29 – Evolução do deslocamento vertical da via para a velocidade de circulação de 300 km/h e de 200 km/h, em função do número de ciclos de carga deslocamento



Analisando os resultados, verifica-se que a evolução do deslocamento vertical da via é semelhante para a velocidade de 300 km/h e para a velocidade de 200 km/h, (sendo ligeiramente superior para a velocidade de 300 km/h), pelo que se pode considerar que a velocidade de circulação não tem influência no deslocamento vertical da via, no caso de via perfeita.

A Fig. 4.30 apresenta a evolução da força de interação roda-carril para a velocidade de circulação de 300 km/h e de 200 km/h, em função do número de ciclos de carga.

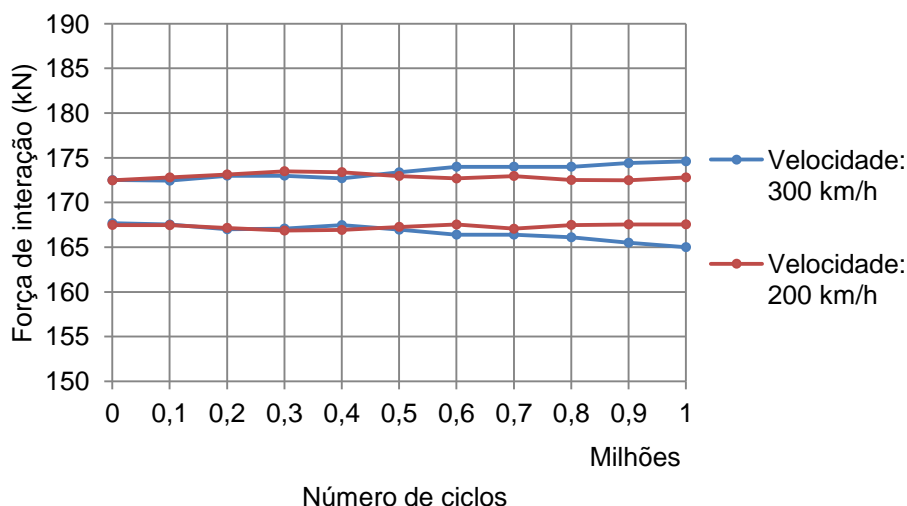


Fig. 4.30 – Evolução da força de interação roda-carril para a velocidade de circulação de 300 km/h e de 200 km/h, em função do número de ciclos de carga

Analisando os resultados, verifica-se que a evolução da força de interação roda-carril é aproximadamente coincidente para as duas velocidades de circulação.

A Fig. 4.31 apresenta a evolução da aceleração vertical (máxima e mínima) de uma travessa para a velocidade de circulação de 300 km/h e de 200 km/h, com o aumento do número de ciclos de carga.

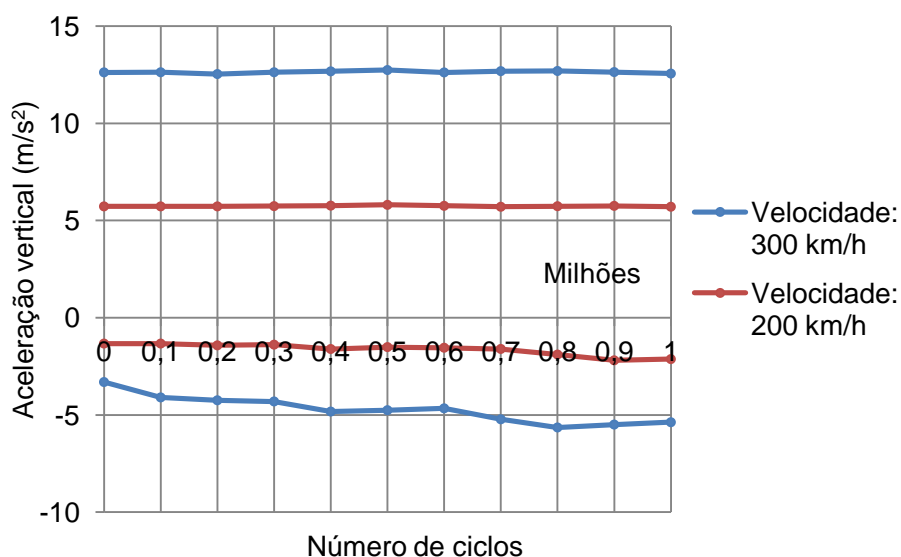


Fig. 4.31 – Evolução da aceleração vertical de uma travessa para a velocidade de circulação de 300 km/h e de 200 km/h, em função do número de ciclos de carga

Analisando os resultados, verifica-se que a evolução da aceleração vertical da travessa é aproximadamente constante ao longo do número de ciclos de carga nas duas velocidades de circulação. Para a velocidade de 200 km/h, verifica-se que a aceleração vertical é menor, sendo que a aceleração máxima diminui para cerca de metade e a aceleração mínima para cerca de um terço, comparativamente com a velocidade de 300 km/h.

#### 4.4.3. INFLUÊNCIA DA POROSIDADE DA CAMADA DE BALASTRO

A influência da porosidade da camada de balastro refere-se à comparação dos resultados obtidos com porosidade de 0,40 e de 0,42, para velocidade de circulação de 300 km/h, e período inicial de estabilização da camada de balastro correspondente a 100000 ciclos de carga.

##### 4.4.3.1. Nível de tensão e deformação

Na Fig. 4.32, representa-se a evolução da tensão de desvio na camada de balastro para valores de porosidade de 0,40 e de 0,42, com o aumento do número de ciclos de carga.

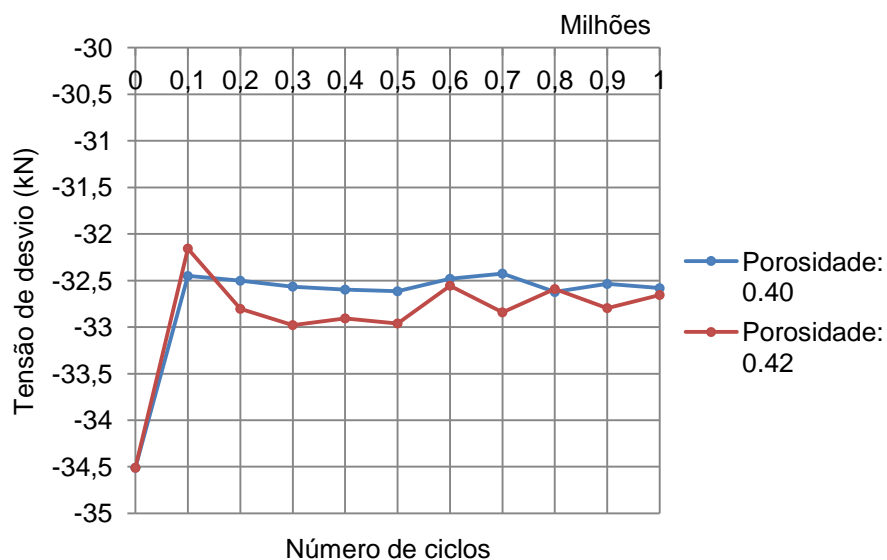


Fig. 4.32 – Evolução da tensão de desvio na camada de balastro para a porosidade de 0,40 e 0,42, em função do número de ciclos de carga

A análise dos resultados permite verificar que a tensão de desvio apresenta uma evolução semelhante relativamente à forma e à grandeza, pelo que a variação do valor da porosidade não influencia o nível de tensão na camada de balastro.

Passa-se à análise da evolução da deformação permanente da camada de balastro. Na Fig. 4.33, representa-se a evolução da deformação permanente da camada de balastro para os dois valores de porosidade referidos, com o aumento do número de ciclos de carga.

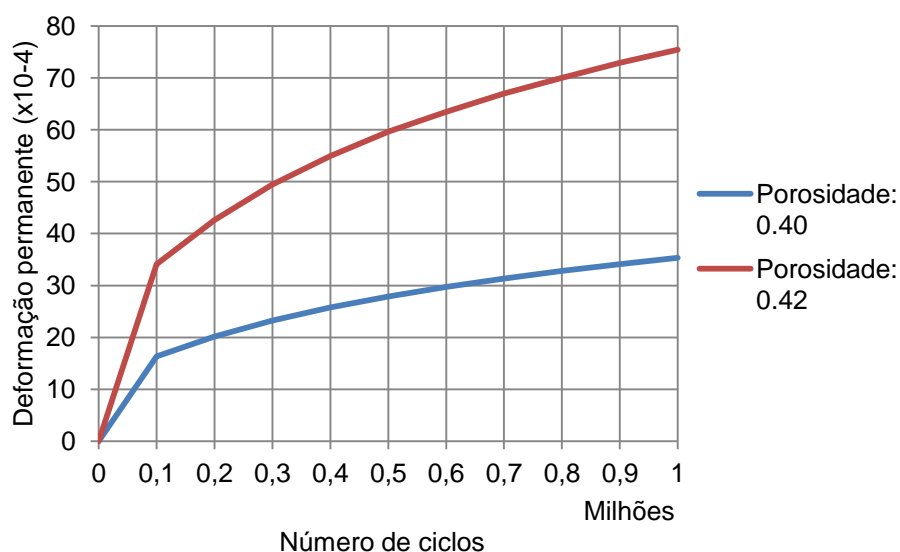


Fig. 4.33 – Evolução da deformação permanente da camada de balastro para a porosidade de 0,40 e 0,42, em função do número de ciclos de carga

Da análise da figura acima, verifica-se que a evolução da deformação permanente é bastante superior para a porosidade de 0,42, comparativamente com o valor de 0,40. Para 1 milhão de ciclos, verifica-se um aumento da deformação superior a 100%, ou seja, a deformação mais do que duplica com o aumento da porosidade da camada de balastro de 0,40 para 0,42.

#### 4.4.3.2. Resultados da análise dinâmica

Na Fig. 4.34, representa-se a evolução do assentamento da camada de balastro para valores de porosidade de 0,40 e de 0,42, com o aumento do número de ciclos de carga.

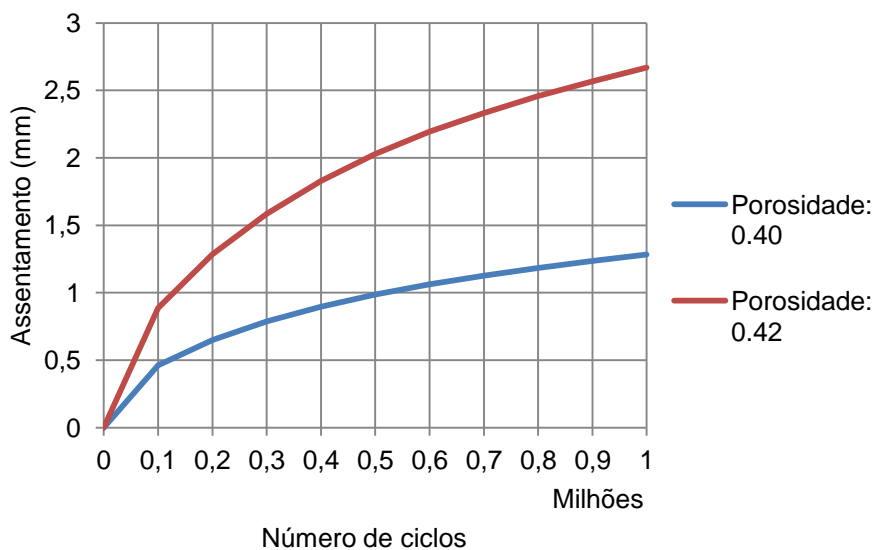


Fig. 4.34 – Evolução do assentamento permanente da camada de balastro para a porosidade de 0,40 e 0,42, em função do número de ciclos de carga

Analisando os resultados, verifica-se que a evolução do assentamento permanente da camada de balastro é bastante superior para a porosidade de 0,42. Ao fim de 1 milhão de ciclos, o assentamento permanente é de 1,28 mm e de 2,67 mm, respetivamente, porosidade de 0,40 e de 0,42.

A Fig. 4.35 apresenta a evolução do assentamento na base de uma travessa e no topo da camada de balastro para a porosidade de 0,40 e de 0,42, em função do número de ciclos de carga. A evolução das duas curvas permite analisar eventuais perdas de contacto entre a base da travessa e o topo da camada de balastro.

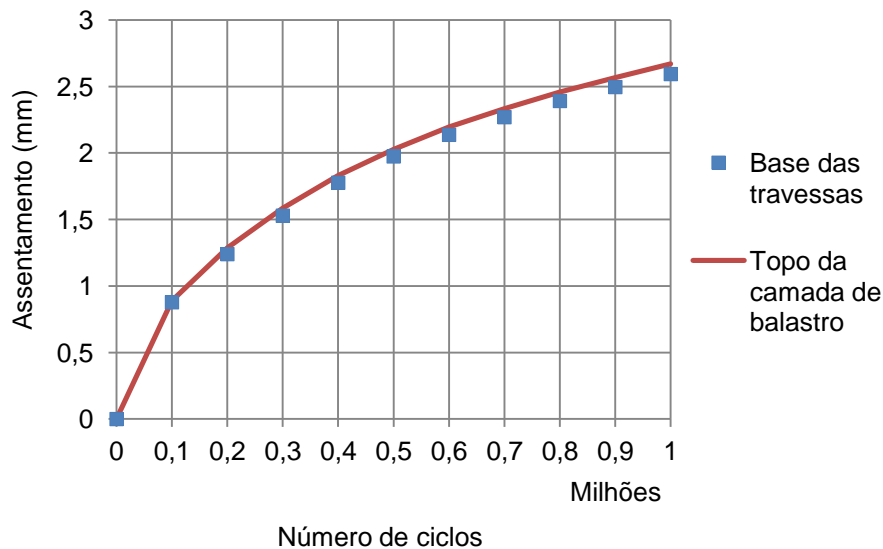


Fig. 4.35 – Evolução do assentamento na base de uma travessa e no topo da camada de balastro para a porosidade de 0,40 e de 0,42, em função do número de ciclos de carga

Analisando a Fig. 4.35, verifica-se que o contacto travessa-balastro se mantém ao longo dos ciclos de carga.

A Fig. 4.36 apresenta a evolução da força de interação travessa-balastro para a porosidade de 0,40 e de 0,42, em com o aumento do número de ciclos de carga.

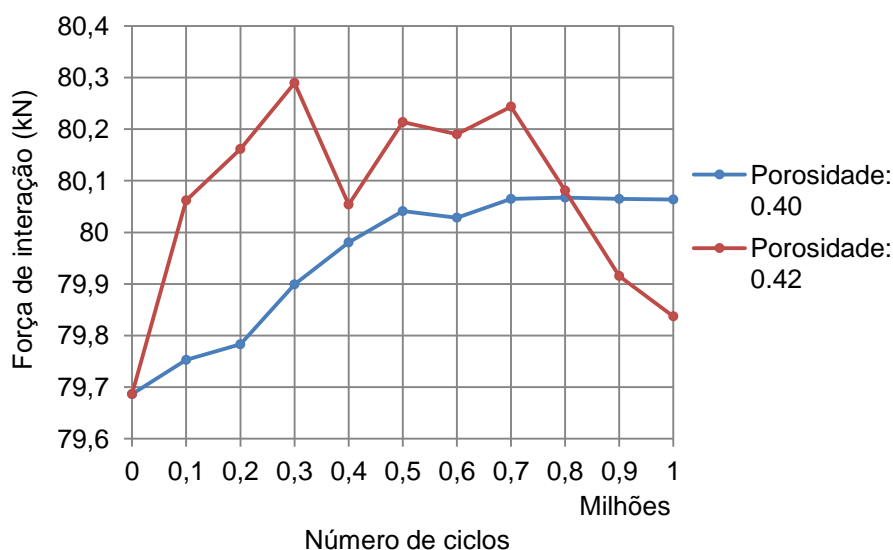


Fig. 4.36 – Evolução da força de interação travessa-balastro para a porosidade de 0,40 e de 0,42, em função do número de ciclos de carga

Analisando os resultados da Fig. 4.36, nota-se que para a porosidade de 0,40 a força de interação travessa-balastro segue uma tendência. Tal não ocorre para a porosidade de 0,42, no entanto a variação percentual entre os valores máximo e mínimo é pequena, da ordem de 1%.

A Fig. 4.37 ilustra a evolução do deslocamento vertical da via para valores de porosidade da camada de balastro de 0,40 e de 0,42, com o aumento do número de ciclos de carga.

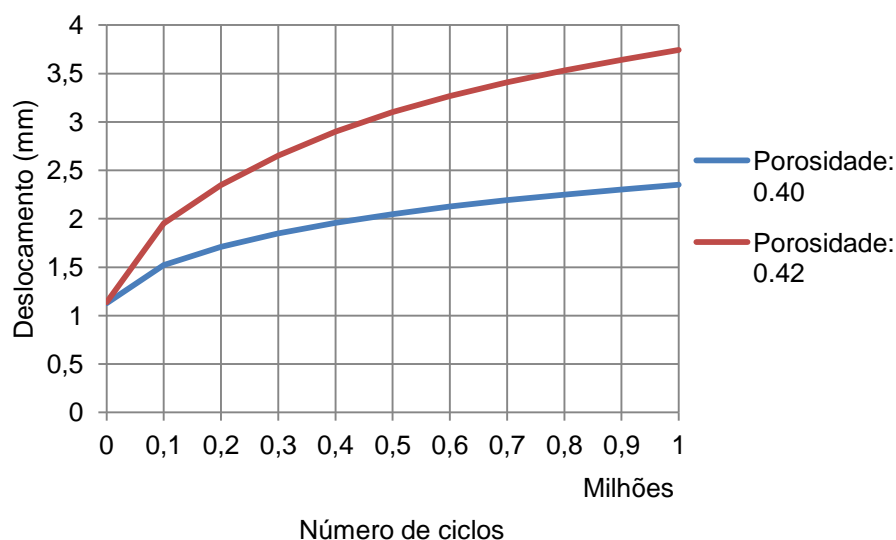


Fig. 4.37 – Evolução do deslocamento vertical da via para a porosidade de 0,40 e de 0,42, em função do número de ciclos de carga

Verifica-se, através da figura acima apresentada, que o deslocamento vertical da via é superior considerando um valor superior para a porosidade. A variação da porosidade de 0,40 para 0,42 implica

neste caso de estudo um acréscimo de aproximadamente 60% do deslocamento vertical da via, para 1 milhão de ciclos.

A Fig. 4.38 apresenta a evolução da força de interação roda-carril para a porosidade da camada de balastro de 0,40 e de 0,42, em função do número de ciclos de carga.

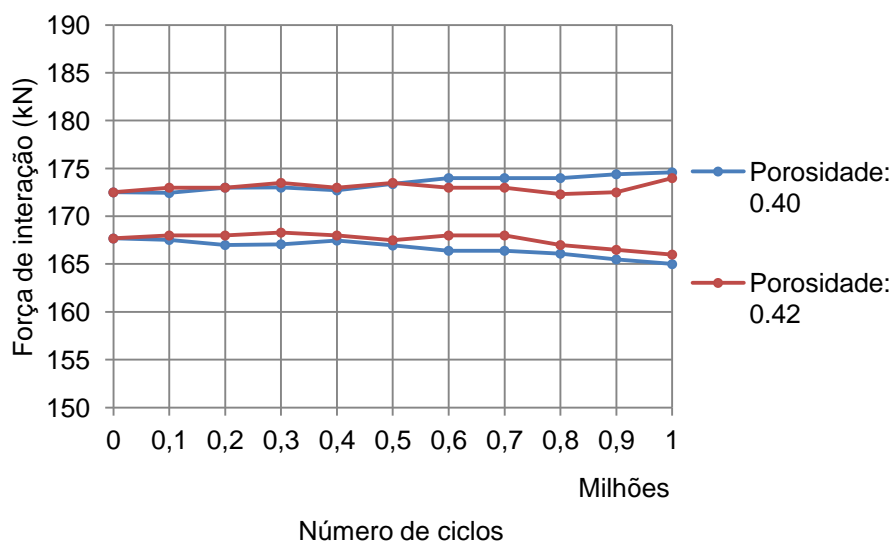


Fig. 4.38 – Evolução da força de interação roda-carril para a porosidade de 0,40 e de 0,42, em função do número de ciclos de carga

Analisando os resultados, verifica-se que a evolução da força de interação roda-carril é aproximadamente coincidente para os dois valores de porosidade.

A Fig. 4.39 apresenta a evolução da aceleração vertical (máxima e mínima) de uma travessa para a porosidade da camada de balastro de 0,40 e de 0,42, em função do número de ciclos de carga.

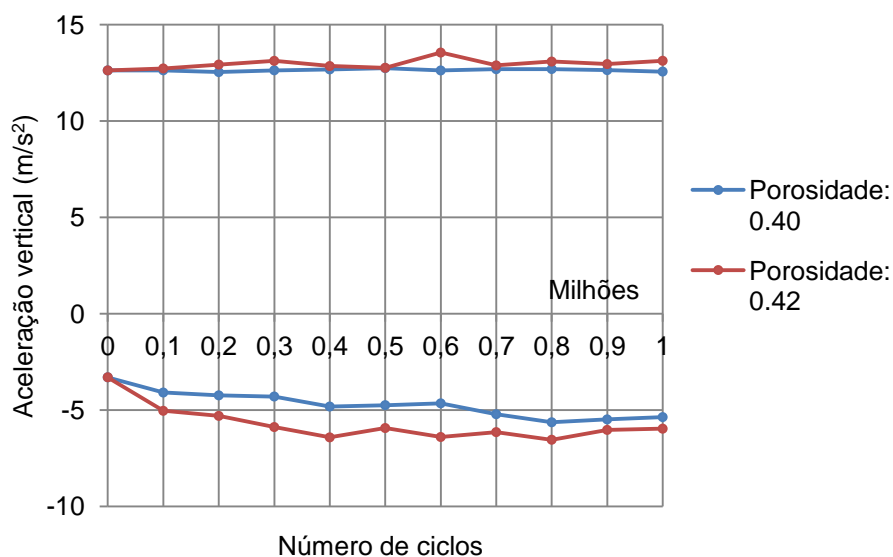


Fig. 4.39 – Evolução da aceleração vertical de uma travessa para a porosidade de 0,40 e de 0,42, em função do número de ciclos de carga

Analizando os resultados, verifica-se que a aceleração vertical máxima da travessa coincide para os dois valores de porosidade considerados, e que a aceleração mínima apresenta uma evolução muito próxima, sendo ligeiramente superior para o valor de porosidade de 0,42.

#### 4.4.4. INFLUÊNCIA DO PERÍODO INICIAL DE ESTABILIZAÇÃO DA CAMADA DE BALASTRO

Efetua-se nesta secção uma análise de sensibilidade relativamente ao número de ciclos de carga considerados no período inicial de estabilização da camada de balastro. No caso base, considerou-se um período de 100000 ciclos de carga -valor indicado por alguns autores (Ionescu, 2004; Lackenby, 2006). Analisa-se agora o caso em que se admite um período de estabilização inicial da camada de balastro corresponde a 50000 ciclos de carga.

##### 4.4.4.1. Nível de tensão e deformação da via

A Fig. 4.40 representa a evolução da tensão de desvio na camada de balastro para o período inicial de estabilização da camada de balastro ( $N_i$ ) equivalente a 100000 ciclos e a 50000 ciclos de carga, com o aumento do número de ciclos de carga.

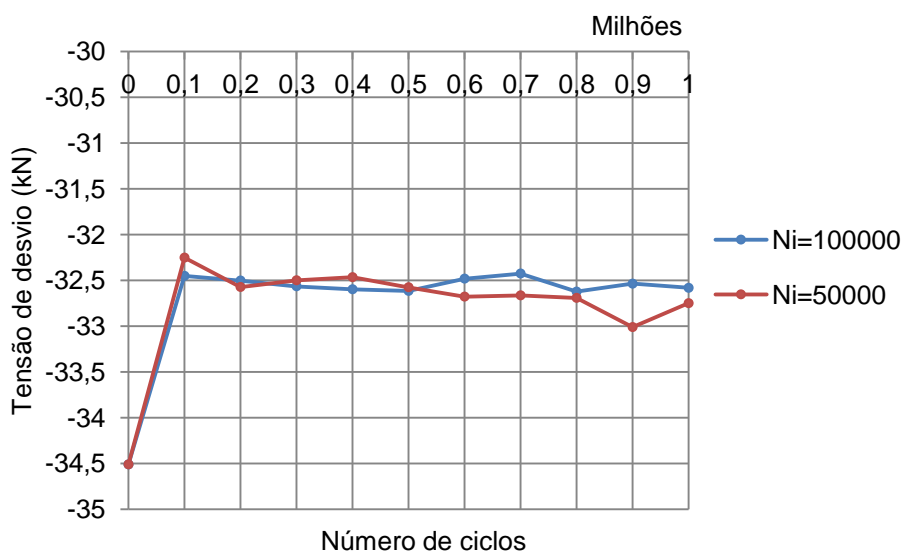


Fig. 4.40 – Evolução da tensão de desvio na camada de balastro para o período inicial de estabilização da camada de balastro equivalente a 100000 ciclos e a 50000 ciclos, em função do número de ciclos de carga

Analizando os resultados, verifica-se que a evolução da tensão de desvio é, em ambos os casos, praticamente coincidente.

A Fig. 4.41 representa a evolução da deformação permanente da camada de balastro para o período inicial de estabilização da camada de balastro ( $N_i$ ) equivalente a 100000 ciclos e a 50000 ciclos de carga, em função do número de ciclos de carga. A evolução da deformação da camada de balastro não será coincidente, uma vez que o assentamento do período inicial de estabilização da camada de balastro é, nesta situação, diferente para cada caso.

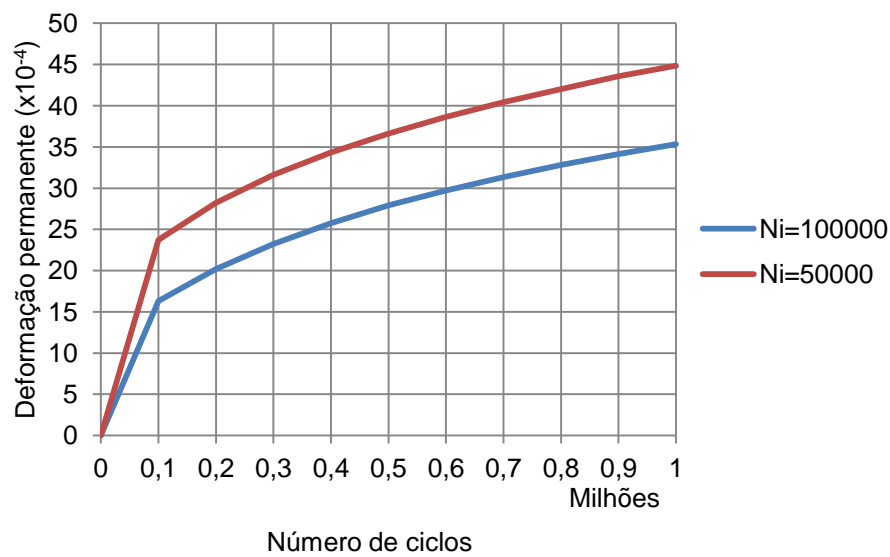


Fig. 4.41 – Evolução da deformação permanente da camada de balastro para o período inicial de estabilização da camada de balastro equivalente a 100000 ciclos e a 50000 ciclos, em função do número de ciclos de carga

Da análise da figura acima apresentada, verifica-se que a evolução da deformação permanente é superior considerando o período inicial de estabilização da camada de balastro mais curto (50000 ciclos ao invés de 100000 ciclos de carga). Ao fim de 1 milhão de ciclos de carga, verifica-se um aumento da deformação permanente em cerca de 25% considerando-se Ni de 50000 ciclos de carga em vez de 100000 ciclos.

#### 4.4.4.2. Resultados da análise dinâmica

A Fig. 4.42 representa a evolução do assentamento permanente da camada de balastro para os períodos iniciais de estabilização da camada de balastro (Ni) equivalente a 100000 ciclos e a 50000 ciclos de carga, com o aumento do número de ciclos de carga.

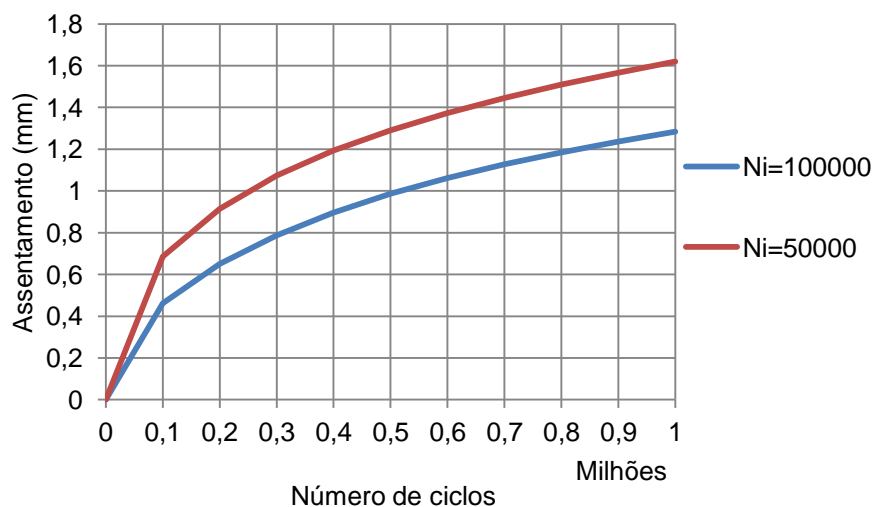


Fig. 4.42 – Evolução do assentamento permanente da camada de balastro para o período inicial de estabilização da camada de balastro equivalente a 100000 e a 50000 ciclos, em função do número de ciclos de carga



Analisando a evolução do assentamento da camada de balastro na Fig. 4.42, verifica-se que esta é superior considerando o período inicial de estabilização da camada de balastro (Ni) equivalente a 50000 ciclos. O assentamento da camada de balastro ao fim de 1 milhão de ciclos de carga é de 1,28 mm e de 1,62 mm, respetivamente, para um período inicial de estabilização da camada de balastro (Ni) equivalente a 100000 ciclos e a 50000 ciclos.

Na Fig. 4.43, apresenta-se a evolução do assentamento na base de uma travessa e no topo da camada de balastro para o período inicial de estabilização da camada de balastro (Ni) equivalente a 50000 ciclos de carga, com o aumento do número de ciclos de carga.

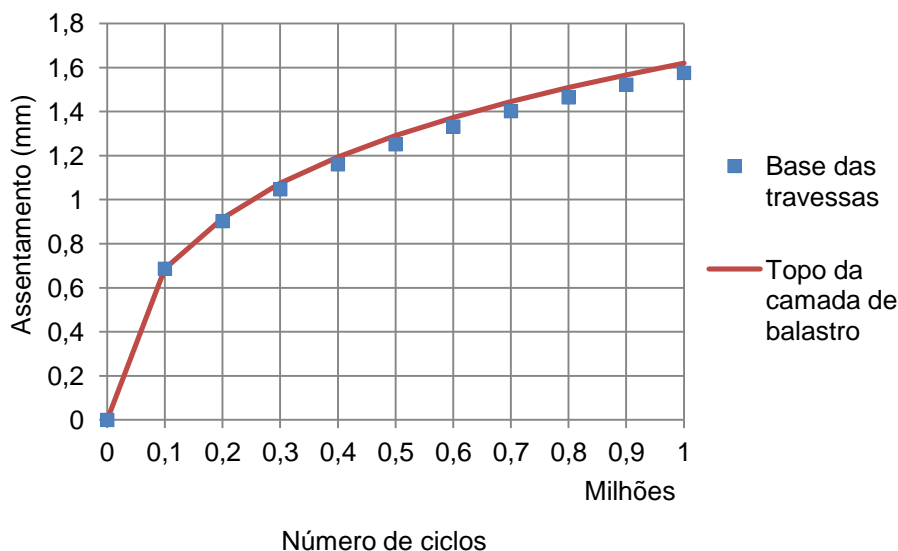


Fig. 4.43 – Evolução do assentamento na base de uma travessa e no topo da camada de balastro para o período inicial de estabilização da camada de balastro equivalente a 50000 ciclos, em função do número de ciclos de carga

Analisando a figura acima, verifica-se que o contacto travessa-balastro se mantém ao longo dos ciclos de carga.

Na Fig. 4.44, apresenta-se a evolução da força de interação travessa-balastro para o período inicial de estabilização da camada de balastro (Ni) equivalente a 100000 ciclos e a 50000 ciclos de carga, com o aumento do número de ciclos de carga.

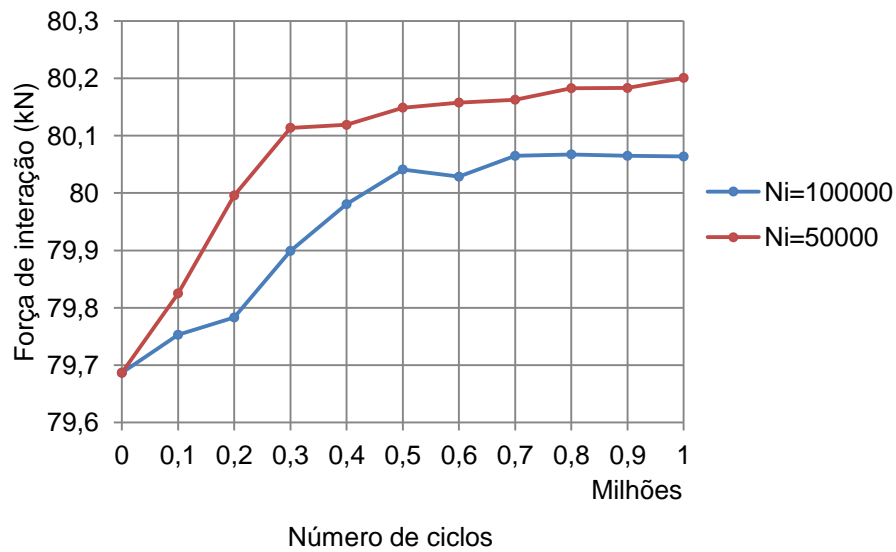


Fig. 4.44 – Evolução da força de interação travessa-balastro para o período inicial de estabilização da camada de balastro equivalente a 100000 e a 50000 ciclos, em função do número de ciclos de carga

Na análise dos resultados, verifica-se que a alteração do período inicial de estabilização da camada de balastro não se faz sentir na força de interação travessa-balastro, uma vez que evolução é em ambos os casos muito aproximada. Para 1 milhão de ciclos, a força de interação apresenta valores de 80,06 kN e 80,20 kN, respetivamente para período inicial de estabilização da camada de balastro equivalente a 100000 ciclos e a 50000 ciclos.

A Fig. 4.45 representa a evolução do deslocamento vertical da via para um período inicial de estabilização da camada de balastro ( $N_i$ ) equivalente a 100000 e a 50000 ciclos de carga, com o aumento do número de ciclos de carga.

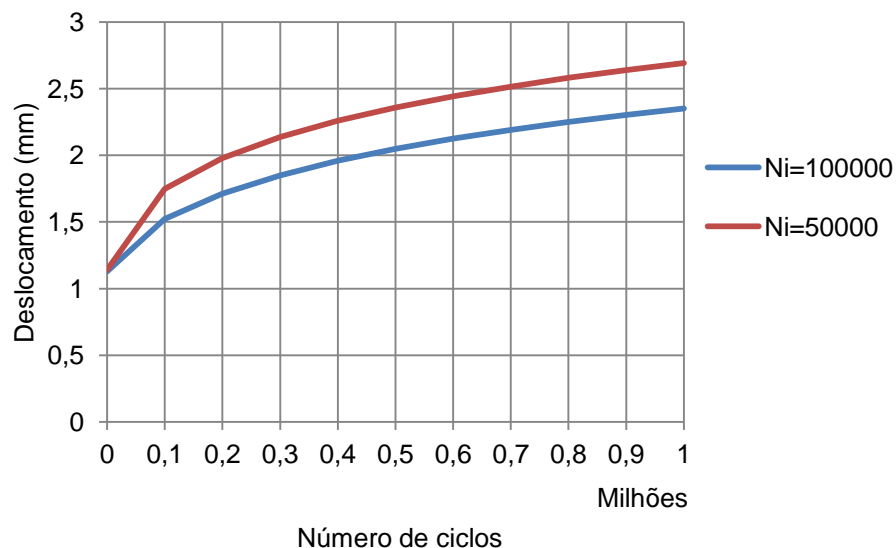


Fig. 4.45 – Evolução do deslocamento vertical da via considerando o período inicial de estabilização da camada de balastro equivalente a 100000 e a 50000 ciclos, em função do número de ciclos de carga

Verifica-se, através da Fig. 4.45, que o deslocamento vertical da via é superior considerando o período inicial de estabilização da camada de balastro equivalente a 50000 ciclos. A alteração do número de ciclos do período inicial de estabilização da camada de balastro de 100000 ciclos para 50000 ciclos de carga induz um aumento do deslocamento da roda de 2,35 mm para 2,69 mm (15%), ao fim 1 milhão de ciclos.

A Fig. 4.46 apresenta a evolução da força de interação roda-carril para o período inicial de estabilização da camada de balastro ( $N_i$ ) equivalente a 100000 ciclos e a 50000 ciclos de carga, em função do número de ciclos de carga.

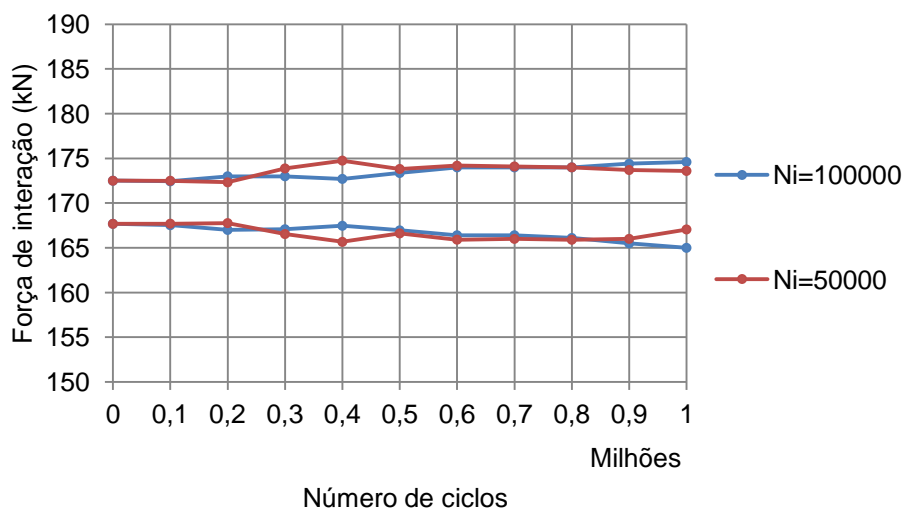


Fig. 4.46 – Evolução da força de interação roda-carril para o período inicial de estabilização da camada de balastro equivalente a 100000 e a 50000 ciclos, em função do número de ciclos de carga

Analisando os resultados, verifica-se que a evolução da força de interação roda-carril é aproximadamente coincidente para o período inicial de estabilização da camada de balastro equivalente a 100000 ciclos e a 50000 ciclos de carga

Na Fig. 4.47, apresenta-se a evolução da aceleração vertical de uma travessa para o período inicial de estabilização da camada de balastro ( $N_i$ ) equivalente a 100000 ciclos e a 50000 ciclos de carga, em função do número de ciclos de carga.

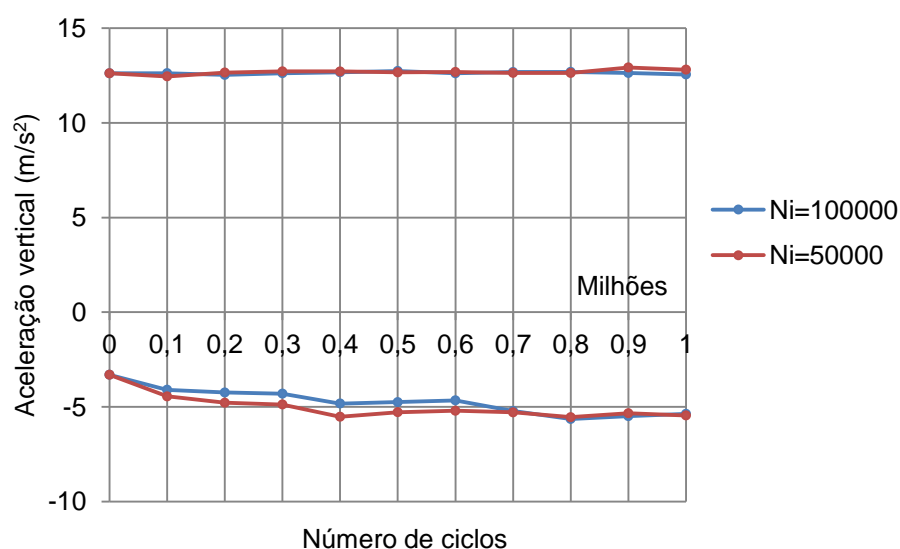


Fig. 4.47 – Evolução da aceleração vertical de uma travessa para o período inicial de estabilização da camada de balastro equivalente a 100000 e a 50000 ciclos, em função do número de ciclos de carga

Na análise dos resultados, verifica-se que a evolução da aceleração vertical das travessas coincide para os dois casos em análise, pelo que a alteração do número de ciclos do período inicial de estabilização da camada de balastro não tem influência ao nível da aceleração vertical da travessa.

#### 4.5. CONCLUSÕES

A análise aos resultados do estudo paramétrico apresentado neste capítulo, permite que sejam retiradas conclusões acerca das três abordagens consideradas: comportamento estático da via, comportamento dinâmico da via a curto prazo e comportamento dinâmico da via a longo prazo.

Relativamente à análise do comportamento estático da via, verificou-se, como seria de esperar, que:

- o deslocamento vertical máximo do carril para a carga aplicada sobre uma travessa ou entre travessas é sensivelmente igual;
- a distribuição do deslocamento vertical do carril pelos constituintes deformáveis da via para os dois casos de carga apresentados (carga aplicada sobre uma travessa e carga aplicada entre travessas) apresenta distribuição e proporcionalidade semelhante;
- a travessa sob a carga recebe cerca de 26% dos 170 kN aplicados e as duas travessas adjacentes cerca de 19%, no caso de carga aplicada sobre uma travessa, fazendo com que 64% da carga aplicada seja absorvida por estes três elementos;
- o par de travessas adjacentes ao ponto de aplicação da carga absorve cerca de 24% do valor da carga e o segundo par de travessas um valor mais reduzido, cerca de 15%, no caso de carga aplicada entre travessas, significando que os quatro elementos recebem uma parte considerável da carga (78%);
- a tensão vertical e a tensão horizontal diminui em profundidade; a tensão vertical e a horizontal são superiores para carga aplicada sobre uma travessa, comparativamente com o caso de a carga ser aplicada entre travessas; relativamente à tensão tangencial, esta é

praticamente nula para a carga aplicada sobre uma travessa, no caso da carga aplicada entre travessas, a tensão tangencial apresenta valores superiores, ainda que com pouca importância relativamente aos valores das outras tensões.

O comportamento dinâmico da via a curto prazo recaiu sobre o estudo da carga dinâmica sobre a via, do deslocamento vertical da roda e da via (sobre uma travessa) e por fim das tensões verticais no balastro, sub-balastro e fundação (sobre uma travessa).

Pelo estudo efetuado, conclui-se que:

- a amplitude da força de interação roda-carril aumenta com o aumento da velocidade, no entanto este aumento da força de interação é reduzido por tratar-se de via perfeita;
- a força de interação varia em torno do valor da carga estática por eixo;
- o aumento da velocidade implica um aumento do deslocamento vertical da via;
- o deslocamento vertical máximo do carril (sobre uma travessa) aumenta ligeiramente com o aumento da velocidade;
- o aumento da velocidade implica um aumento da tensão vertical nas camadas de elementos finitos, no entanto, este aumento é muito reduzido.

A análise do comportamento da via a longo prazo teve como principal objetivo determinar a evolução de alguns parâmetros definidores da qualidade das vias férreas balastradas, assim como, estabelecer a influência da velocidade de circulação, da porosidade da camada de balastro e do período inicial de estabilização da camada de balastro, sendo portanto, as três variáveis em estudo.

Relativamente à influência da velocidade de circulação do veículo no comportamento da via férrea balastrada, conclui-se que:

- a tensão de desvio apresenta uma evolução semelhante para as duas velocidades de circulação, pelo que a velocidade não tem influência na tensão de desvio;
- a evolução da deformação permanente com o número de ciclos de carga coincide para as duas velocidades de circulação, resultando que a velocidade de circulação não influencia a evolução da deformação permanente da camada de balastro;
- a evolução do assentamento da camada de balastro com o número de ciclos de carga é igual para as duas velocidades, pelo que a velocidade não tem influência na evolução do assentamento da camada de balastro, por tratar-se de via perfeita;
- a diminuição da velocidade provoca uma diminuição (desprezável) da força de interação travessa-balastro;
- a diferença da evolução do deslocamento vertical da via pode-se considerar desprezável, ou seja, que a velocidade de circulação não tem influência no deslocamento vertical da via;
- a evolução da força de interação roda-carril com o número de ciclos de carga é aproximadamente coincidente para as duas velocidades de circulação;
- a diminuição da velocidade de circulação provoca uma diminuição da aceleração vertical das travessas;
- o contacto travessa-balastro mantém-se ao longo dos ciclos de carga.

Relativamente à influência da porosidade da camada de balastro no comportamento da via férrea balastrada, conclui-se que:

- a tensão de desvio apresenta uma evolução semelhante com o aumento do número de ciclos de carga relativamente à forma e à grandeza, pelo que a porosidade da camada de balastro não tem influência na tensão de desvio;
- a evolução da deformação permanente é bastante superior para a porosidade de 0,42, comparativamente com o valor de 0,40. Para 1 milhão de ciclos de carga, a deformação permanente sofre um aumento superior a 100%, ou seja, a deformação mais que duplica com o aumento da porosidade de 0,40 para 0,42, resultando que a porosidade tem uma grande influência na evolução da deformação permanente;
- a evolução do assentamento da camada de balastro é também bastante superior para a porosidade de 0,42. Ao fim de 1 milhão de ciclos de carga, o assentamento é de 1,28 mm e de 2,67 mm, respetivamente, porosidade de 0,40 e de 0,42, resultando num aumento de mais de 100%, pelo que a porosidade tem uma grande influência na evolução do assentamento permanente da camada de balastro;
- a porosidade da camada de balastro não tem influência na força de interação travessa-balastro, no caso estudado;
- o deslocamento vertical da via aumenta com o aumento da porosidade;
- a evolução da força de interação roda-carril com o número de ciclos de carga é aproximadamente coincidente para as duas porosidades da camada de balastro;
- a porosidade não tem influência na aceleração das travessas nos cenários analisados;
- o contacto travessa-balastro se mantém ao longo dos ciclos de carga.

Relativamente à influência do número de ciclos de carga considerados no período inicial de estabilização da camada de balastro no comportamento da via férrea balastrada, conclui-se que:

- a evolução da tensão de desvio é em ambos os casos estudados praticamente coincidente, pelo que não há influência do período inicial de estabilização da camada de balastro na tensão de desvio;
- a evolução da deformação permanente é superior considerando o período inicial de estabilização da camada de balastro mais curto (50000 ciclos). Para 1 milhão de ciclos, a deformação permanente aumenta em cerca de 25%, pelo que o período inicial de estabilização da camada de balastro tem alguma influência na deformação permanente;
- a evolução do assentamento da camada de balastro, é superior considerando o período inicial de estabilização da camada de balastro equivalente a 50000 ciclos de carga. O assentamento da camada de balastro ao fim de 1 milhão de ciclos de carga é de 1,28 mm e de 1,62 mm, respetivamente, período inicial de estabilização da camada de balastro equivalente a 100000 ciclos e a 50000 ciclos de carga, aumentando assim cerca de 25%;
- a influência da alteração do período inicial de estabilização da camada de balastro não se faz sentir na força de interação travessa-balastro uma vez que evolução é em ambos os casos muito aproximada;
- o deslocamento vertical da via é superior considerando o período inicial de estabilização da camada de balastro equivalente a 50000 ciclos de carga. A alteração do número de ciclos carga de 100000 ciclos para 50000 ciclos induz um aumento de 15 % ao deslocamento da via, pelo que o assentamento inicial tem alguma influência;

- a evolução da força de interação roda-carril com o número de ciclos de carga é em ambos os casos estudados praticamente coincidente, pelo que não há influência do período inicial de estabilização da camada de balastro na força de interação roda-carril;
- o período inicial de estabilização da camada de balastro não tem influência ao nível da aceleração vertical da travessa;
- o contacto travessa-balastro se mantém ao longo dos ciclos de carga.

Em resumo, da Fig. 4.48 à Fig. 4.53 apresenta-se a evolução da tensão de desvio na camada de balastro, da deformação permanente da camada de balastro, do deslocamento vertical da roda, da força de interação travessa-balastro e da aceleração vertical de uma travessa, para complemento e melhor precessão das conclusões mencionadas sobre a análise do comportamento a longo prazo da via férrea.

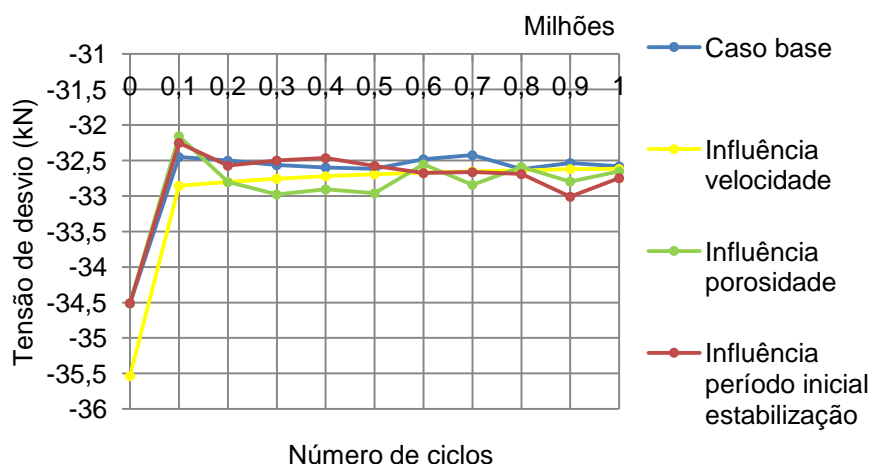


Fig. 4.48 - Evolução da tensão de desvio na camada de balastro no alinhamento vertical de uma travessa, em função do número de ciclos de carga

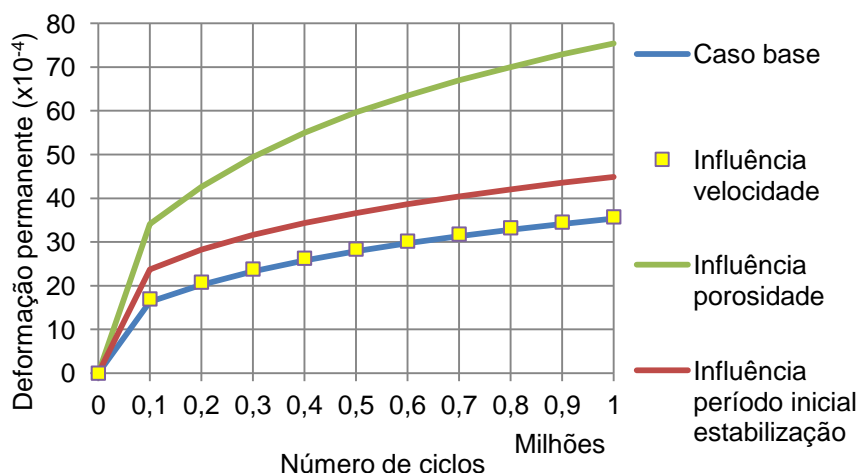


Fig. 4.49 - Evolução do assentamento permanente no topo da camada de balastro no alinhamento vertical de uma travessa, em função do número de ciclos de carga

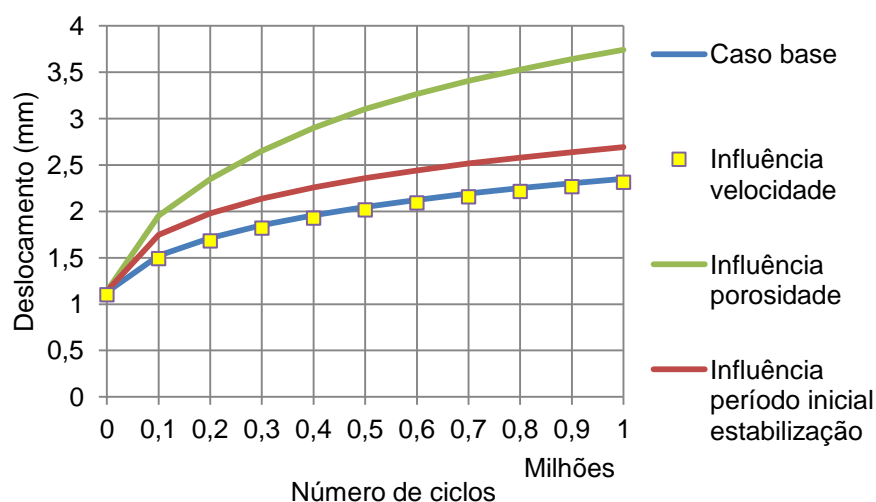


Fig. 4.50 – Evolução do deslocamento vertical da via, em função do número de ciclos de carga

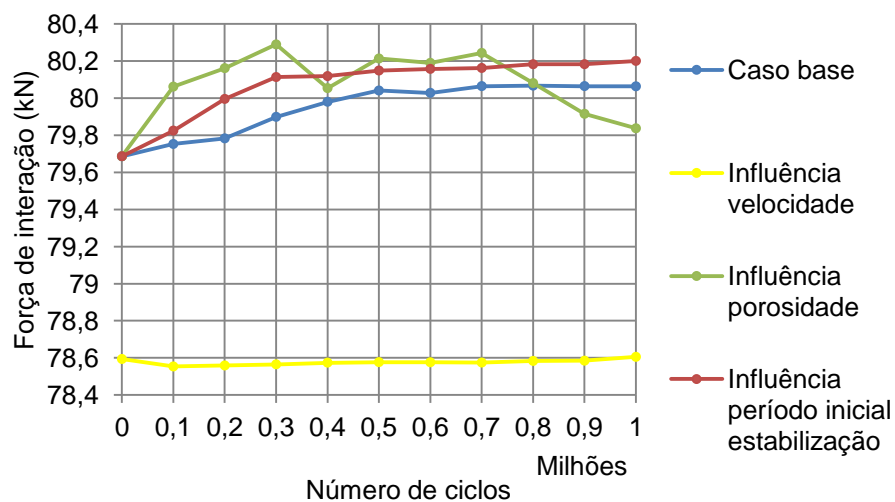


Fig. 4.51 - Evolução da força máxima de interação travessa-balastro, em função do número de ciclos de carga



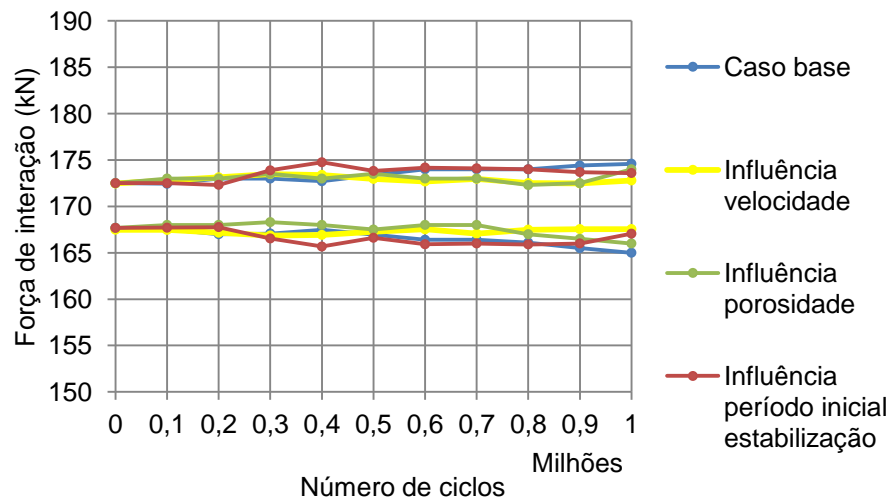


Fig. 4.52 – Evolução da força de interação roda-carril, em função do número de ciclos de carga

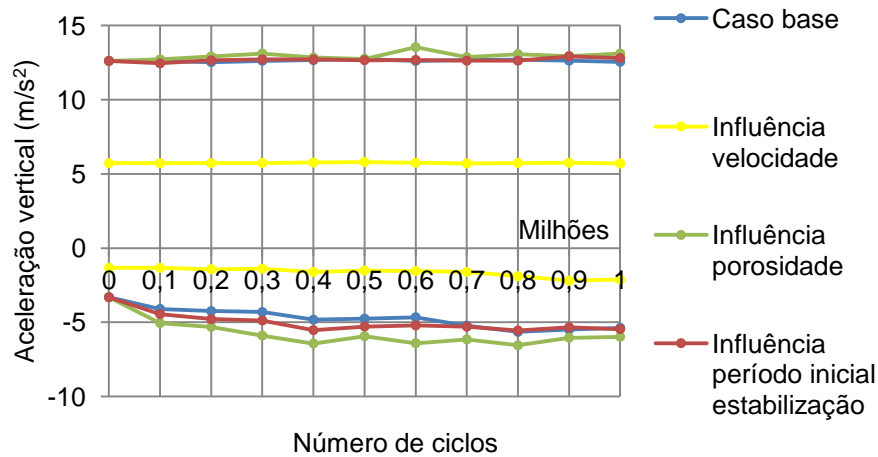


Fig. 4.53 - Evolução da aceleração vertical de uma travessa, em função do número de ciclos de carga

# 5

## AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA VIA BALASTRADA COM DEFEITO PONTUAL

### 5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, apresenta-se um estudo numérico para a avaliação da influência da qualidade geométrica da via no comportamento a curto e a longo prazo da via balastrada.

Na secção 5.2, apresenta-se a análise do comportamento dinâmico da via a curto prazo considerando um defeito pontual, relativamente à força de interação roda-carril, deslocamento vertical da via e da roda e à tensão vertical nas camadas da via.

Na secção 5.3, analisa-se o comportamento dinâmico da via a longo prazo, tendo como principal objetivo o estudo da influência da qualidade geométrica da via, concretamente de um defeito pontual, no assentamento permanente, e portanto, na degradação da via.

### 5.1. COMPORTAMENTO DINÂMICO A CURTO PRAZO DA VIA COM DEFEITO PONTUAL

Apresenta-se nesta secção o estudo do comportamento dinâmico da via a curto prazo com defeito pontual quando solicitada pela passagem de um veículo à velocidade de 300 km/h.

Efetua-se a análise da força de interação roda-carril, da posição vertical da roda, do deslocamento vertical da via, e por fim das tensões verticais nas camadas de balastro, de sub-balastro e na fundação (quando a carga dinâmica passa sobre uma travessa).

Na Fig. 5.1, apresenta-se a geometria e a expressão analítica do defeito pontual considerado neste estudo (e já referido na secção 2.5). Como se pode verificar na figura, adotou-se como valor de pico  $A$  8 mm, correspondente ao limite de alerta definido pela UIC518 (2005) e uma extensão de cerca de 12 m.

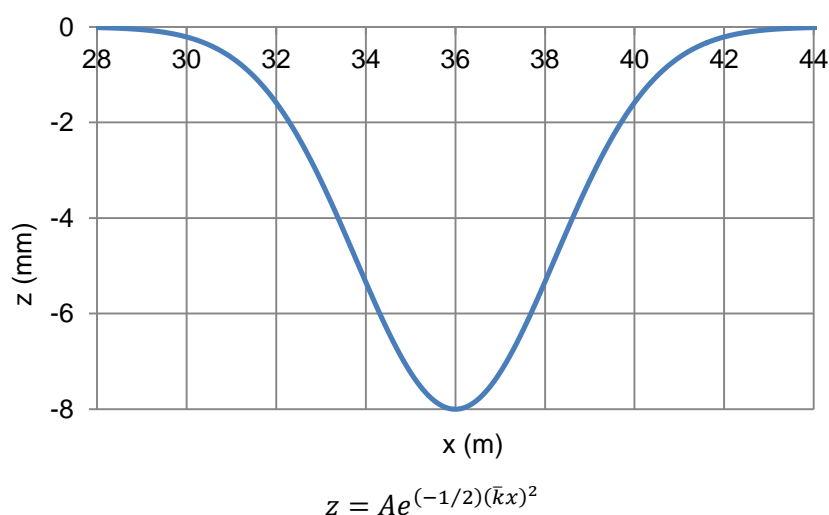


Fig. 5.1 – Geometria e expressão analítica de defeito pontual da via ( $A = 8 \text{ mm}$ ;  $\bar{k} = 0,45$ )

A Fig. 5.2 representa a variação da força de interação roda-carril na zona de influência do defeito pontual.

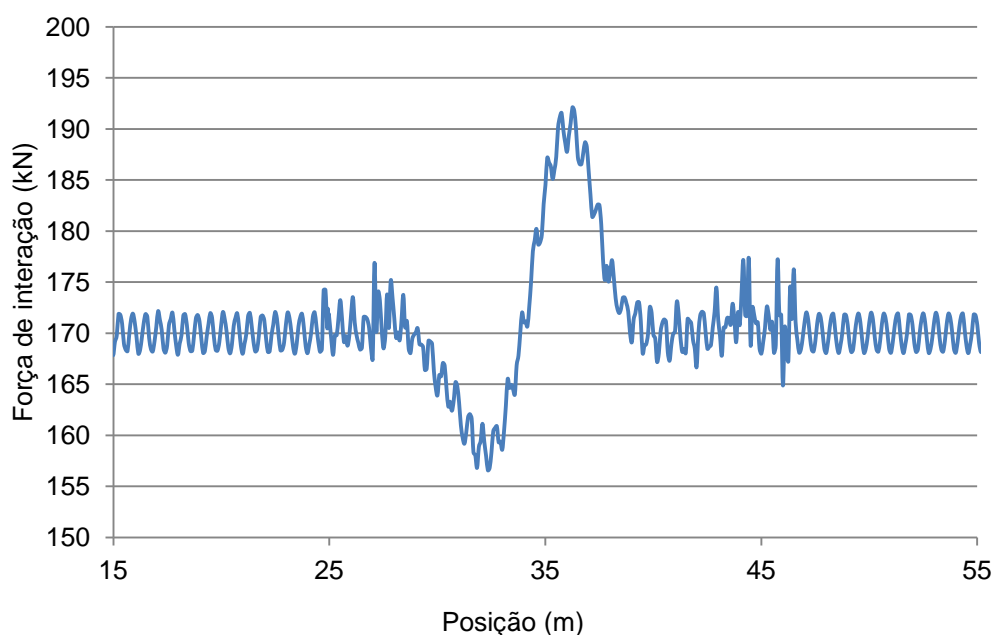


Fig. 5.2 – Força de interação roda-carril ao longo da via

Analisando os resultados, verifica-se que a presença do defeito pontual da via provoca uma variação da força de interação roda carril na zona de influência do mesmo. Considerando a parte inicial e final do gráfico, que corresponde a via perfeita, e a via com defeito pontual, verifica-se que a força de interação roda-carril máxima é cerca de 13% superior à carga estática.

A Fig. 5.3 apresenta a posição vertical de uma roda ao circular sobre a via.

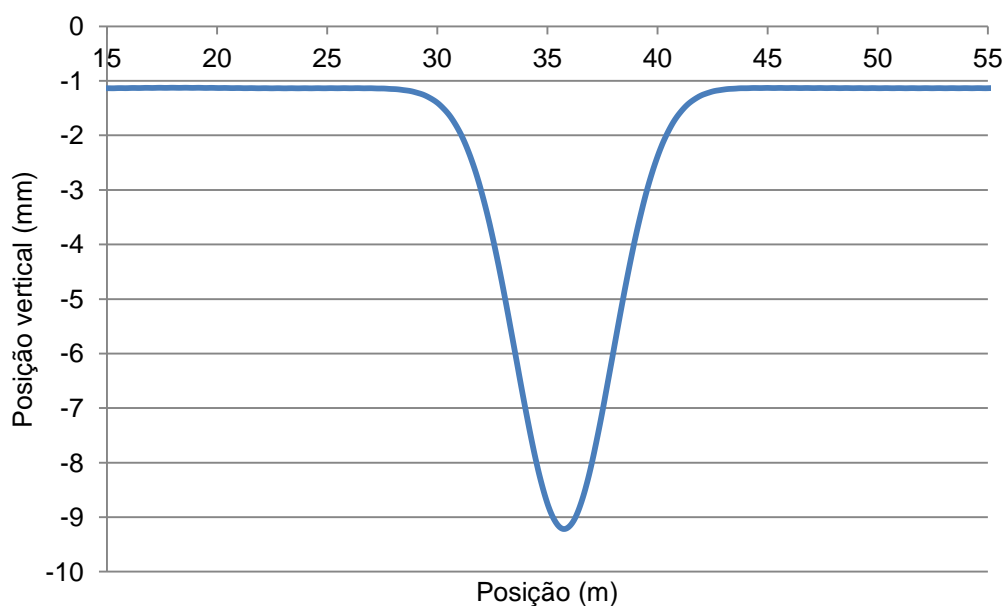


Fig. 5.3 - Posição vertical da roda ao longo da via

Analisando os resultados, verifica-se que o valor máximo da posição vertical da roda é de aproximadamente 9,2 mm, sendo 8 mm correspondentes à amplitude máxima do defeito pontual da via e os restantes 1,2 mm à deformação da via. A posição vertical da roda fora da zona do defeito pontual corresponde à circulação do veículo em via perfeita e é de aproximadamente 1,1 mm. A diferença entre a posição em via perfeita e com defeito pontual (1,1 mm e 1,2 mm, respetivamente), deverá estar relacionado com o aumento da força de interação roda-carril devido à existência do defeito pontual.

Apresenta-se na Fig. 5.4, o registo temporal do deslocamento vertical do carril sobre uma travessa situada aproximadamente no alinhamento vertical da amplitude máxima do defeito pontual.

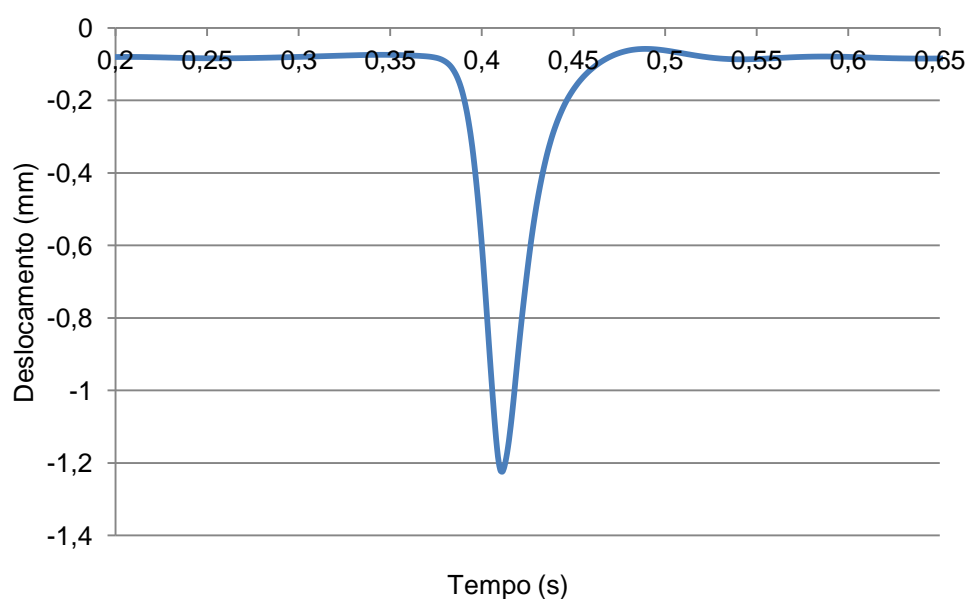


Fig. 5.4 – Deslocamento vertical do carril no alinhamento de uma travessa

Analisando os resultados, verifica-se que o deslocamento vertical máximo do carril é de aproximadamente 1,2 mm, estando portanto, coerente com o deslocamento vertical da roda nesta zona da via.

Na Fig. 5.5 a Fig. 5.7 apresenta-se o registo temporal da tensão vertical, nas diferentes camadas de elementos finitos da camada de balastro, sub-balastro e fundação, respetivamente, sob a travessa situada aproximadamente na zona da via com maior amplitude do defeito pontual.

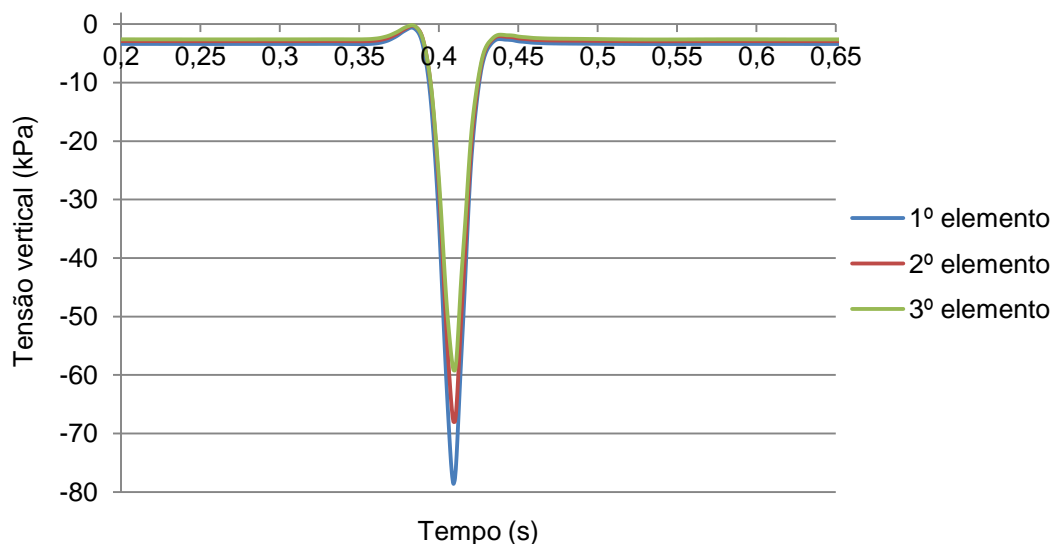


Fig. 5.5 – Tensão vertical na camada de balastro para a via com defeito pontual

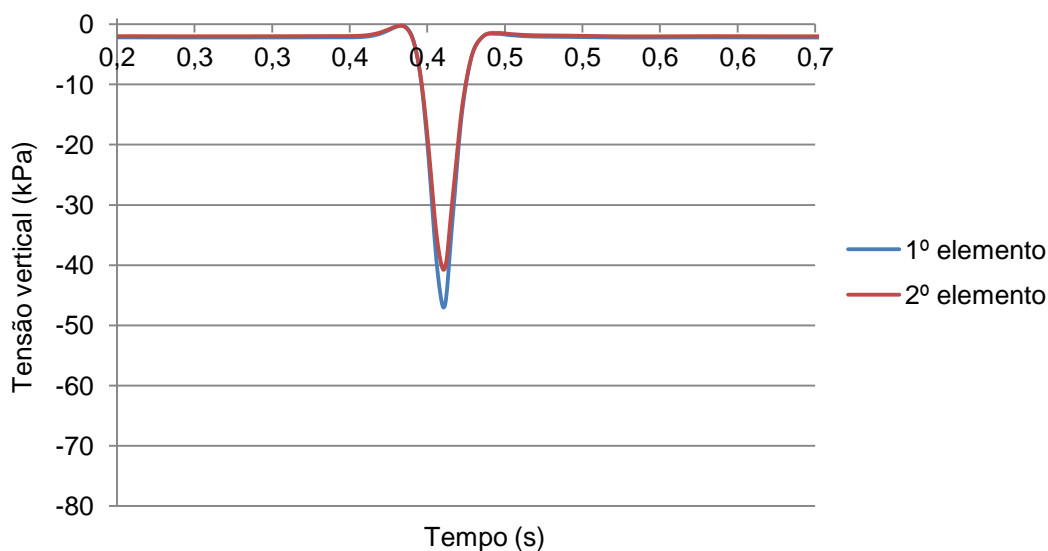


Fig. 5.6 – Tensão vertical na camada de sub-balastro

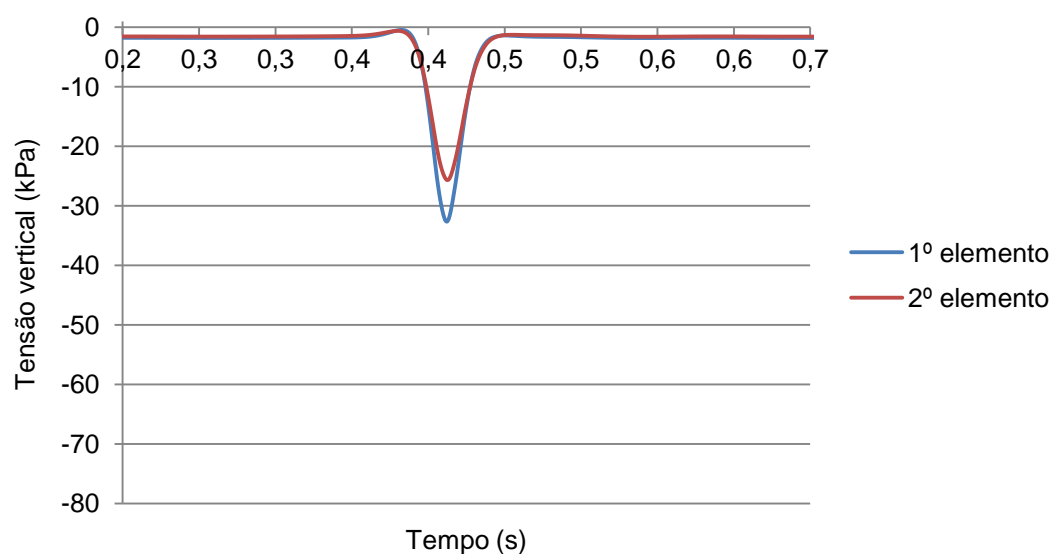


Fig. 5.7 – Tensão vertical na camada de fundação

No Quadro 5.1, apresenta-se o valor máximo da tensão vertical em cada elemento das várias camadas granulares da via, considerando a travessa situada na zona do defeito pontual e uma outra em via perfeita, podendo assim comparar-se a influência do defeito pontual na tensão vertical das camadas da via.

Quadro 5.1 – Tensão vertical nas camadas da via

		Tensão $\sigma_v$ (kPa)	
		Via perfeita	Defeito pontual
Balastro	1º Elemento	-70,1	-75,2
	2º Elemento	-61,3	-65,0
	3º Elemento	-53,3	-56,6
Sub-balastro	1º Elemento	-42,4	-44,8
	2º Elemento	-36,8	-38,8
Fundação	1º Elemento	-29,6	-30,8
	2º Elemento	-23,3	-24,0

Analisando os resultados apresentados nas Figuras e no Quadro, verifica-se que a tensão vertical é superior nas camadas de elementos finitos para a via com defeito pontual, comparativamente com a via perfeita. O efeito do aumento da força de interação roda-carril (razão pela qual a tensão vertical nas camadas da via aumenta) reduz-se em profundidade, sendo maior na camada de balastro e menor na fundação da via.

## 5.2. COMPORTAMENTO DINÂMICO A LONGO PRAZO DA VIA COM DEFEITO PONTUAL

Apresenta-se nesta secção o estudo do comportamento dinâmico da via a longo prazo com defeito pontual quando solicitada pela passagem de um veículo.

A análise com inclusão de um defeito pontual na via refere-se ao estudo para velocidade de circulação do veículo de 300 km/h, porosidade da camada de balastro de 0,40 e período inicial de estabilização da camada de balastro equivalente a 100000 ciclos de carga, pelo que os resultados obtidos poderão ser comparados com os obtidos para o “caso base” apresentados em 4.4.

### 5.2.1. Nível de tensão e deformação

Na Fig. 5.8, apresenta-se a evolução da tensão de desvio na camada de balastro ao longo da via devido ao defeito pontual, para cada ciclo de carga. Os pontos representados no gráfico correspondem ao valor médio da tensão de desvio sob cada da travessa, para os diferentes ciclos de carga.

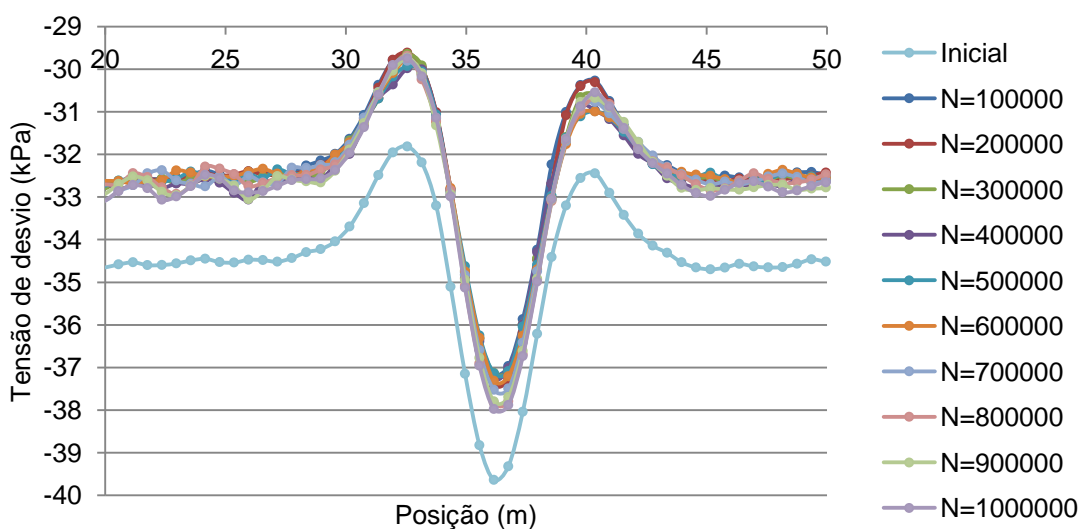


Fig. 5.8 – Evolução da tensão de desvio ao longo da via na camada de balastro em função do número de ciclos de carga

A análise dos resultados permite verificar que a tensão de desvio sofre uma variação na zona de influência do defeito pontual da via.

Na Fig. 5.9, representa-se a evolução da tensão de desvio na camada de balastro para o caso base e para a via com defeito pontual, em função do número de ciclos de carga. O resultado agora apresentado assim como os restantes que sejam diferentes de travessa para travessa consideram a travessa situada aproximadamente sobre o alinhamento vertical da amplitude máxima do defeito da via.

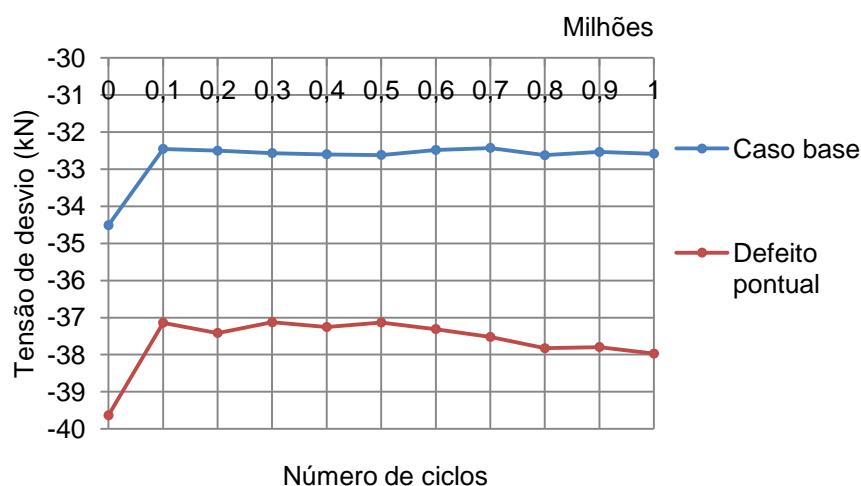


Fig. 5.9 – Evolução da tensão de desvio na camada de balastro no alinhamento vertical de uma travessa em função do número de ciclos de carga

A evolução da tensão de desvio em função do número de ciclos de carga é praticamente constante para a via com defeito pontual (à semelhança do que acontece para o caso base) mas superior em cerca de 15% comparativamente com o caso base.

Na Fig. 5.10 representa-se a evolução da deformação permanente da camada de balastro para o caso base e para a via com defeito pontual, em função do número de ciclos de carga.

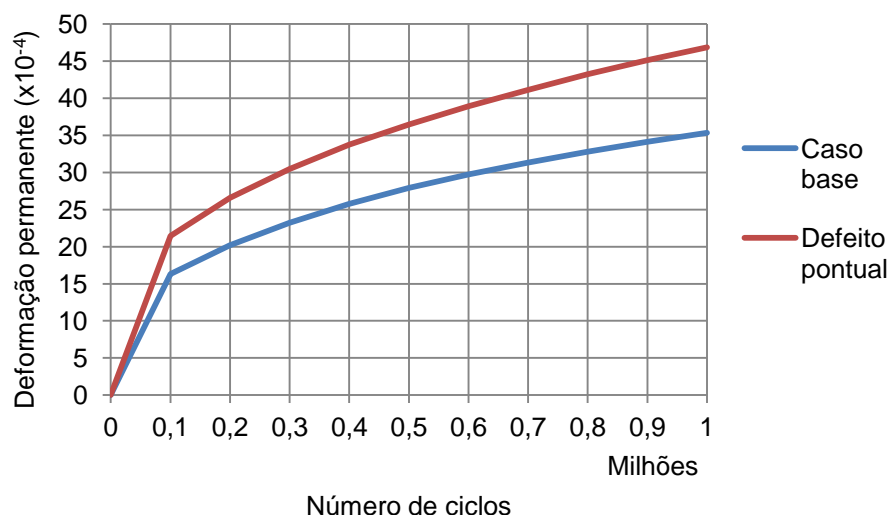


Fig. 5.10 – Evolução da deformação permanente da camada de balastro em função do número de ciclos de carga (travessa localizada no alinhamento vertical de amplitude máxima do defeito)

Como era expectável, a deformação permanente da camada de balastro é também superior na via com defeito comparativamente com o caso base tendo-se verificado um aumento de cerca de 30%.



### 5.2.2. Resultados da análise dinâmica

A Fig. 5.11 apresenta o assentamento no topo da camada de balastro, ao longo da via, para cada ciclo de carga. Os pontos representados no gráfico correspondem ao valor do assentamento obtido no alinhamento vertical de cada travessa.

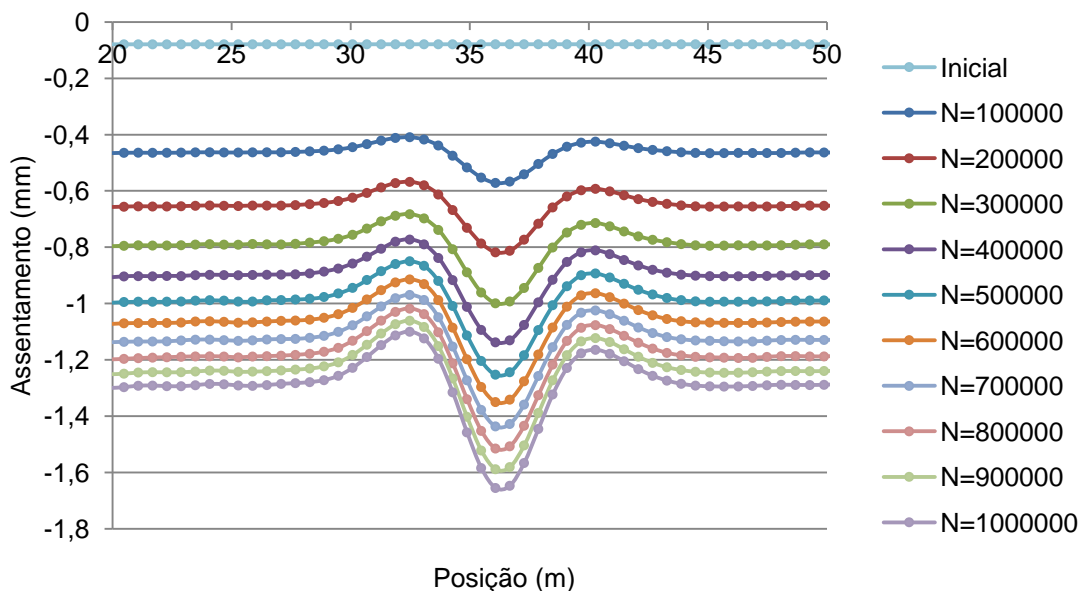


Fig. 5.11 – Assentamento no topo da camada de balastro ao longo da via para cada ciclo de carga

Analisando os resultados, verifica-se a perturbação do defeito da via no assentamento permanente da camada de balastro. Na Fig. 5.12 representa-se a evolução do assentamento da camada de balastro para o “caso base” e para a via com defeito pontual, em função do número de ciclos de carga.

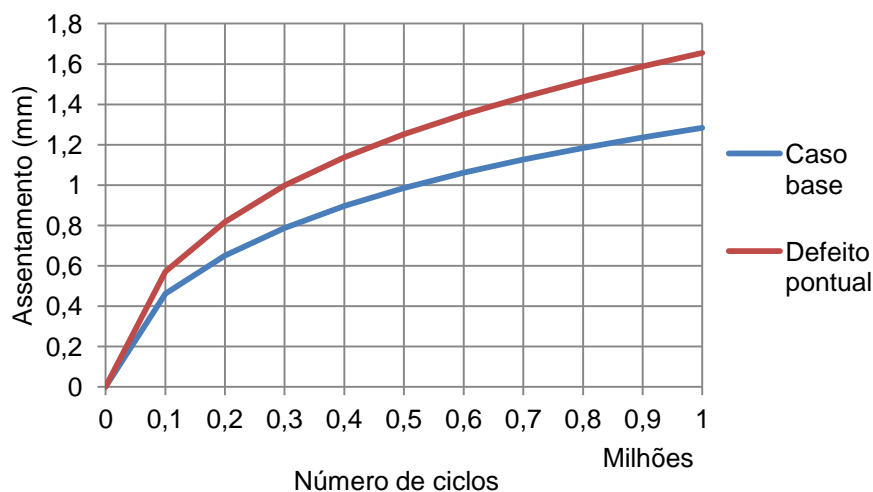


Fig. 5.12 - Evolução do assentamento da camada de balastro em função do número de ciclos de carga

A evolução do assentamento permanente da camada de balastro é superior para a via com defeito pontual. Ao fim de 1 milhão de ciclos, o assentamento permanente é de 1,28 mm e de 1,65 mm, respetivamente, caso base e via com defeito pontual.

A Fig. 5.13 representa a evolução do assentamento no topo da camada de balastro e na base de uma travessa para a via com defeito pontual, em função do número de ciclos de carregamento.

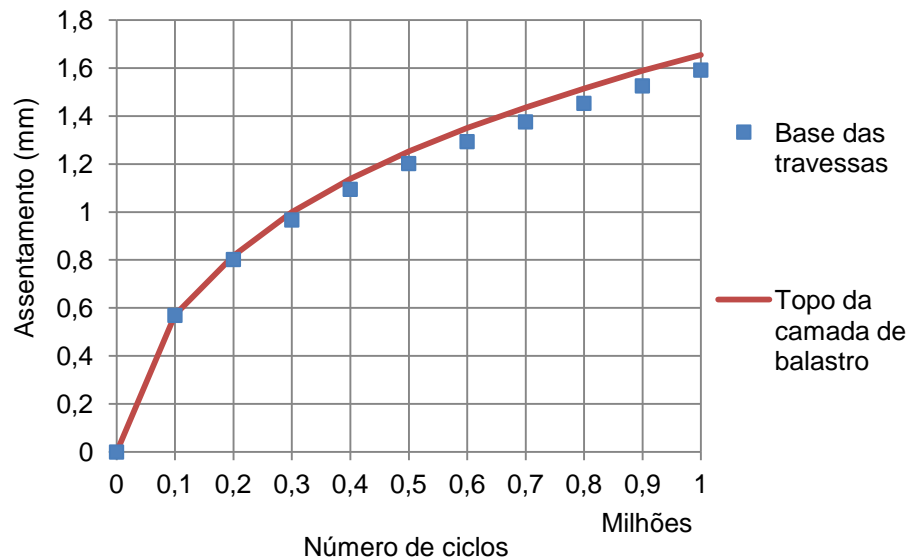


Fig. 5.13 – Evolução do assentamento na base de uma travessa e no topo da camada de balastro em função do número de ciclos de carga

A evolução das duas curvas do gráfico acima permite analisar eventuais perdas de contacto entre a base da travessa e o topo da camada de balastro. Uma vez que a travessa localizada no alinhamento da amplitude máxima do defeito pontual não é obrigatoriamente a mais gravosa para a perda de contacto travessa-balastro, apresenta-se na Fig. 5.14, o assentamento na base das travessas e no topo da camada de balastro ao fim de 1 milhão de ciclos de carga, ao longo da via.

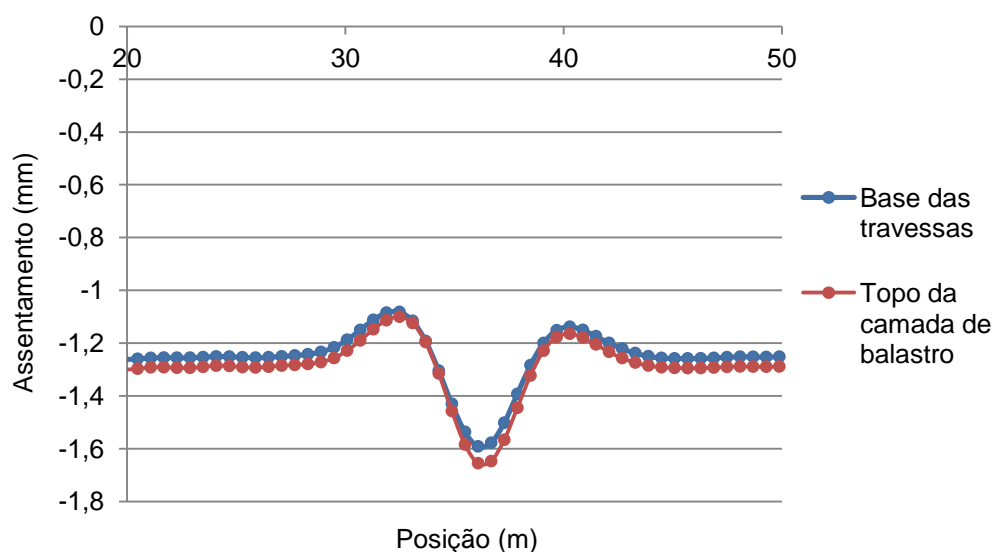


Fig. 5.14 - Assentamento na base das travessas e no topo da camada de balastro ao fim de 1 milhão de ciclos de carga, ao longo da via

Analisando os resultados, verifica-se o que o contacto travessa-balastro se mantém ao longo dos ciclos de carga, em todas as travessas da via.

Na Fig. 5.15, apresenta-se a evolução da força de interação máxima travessa-balastro, ao longo da via, em função do número de ciclos de carga. Cada ponto representado no gráfico corresponde à força de interação travessa-balastro em cada travessa da via.

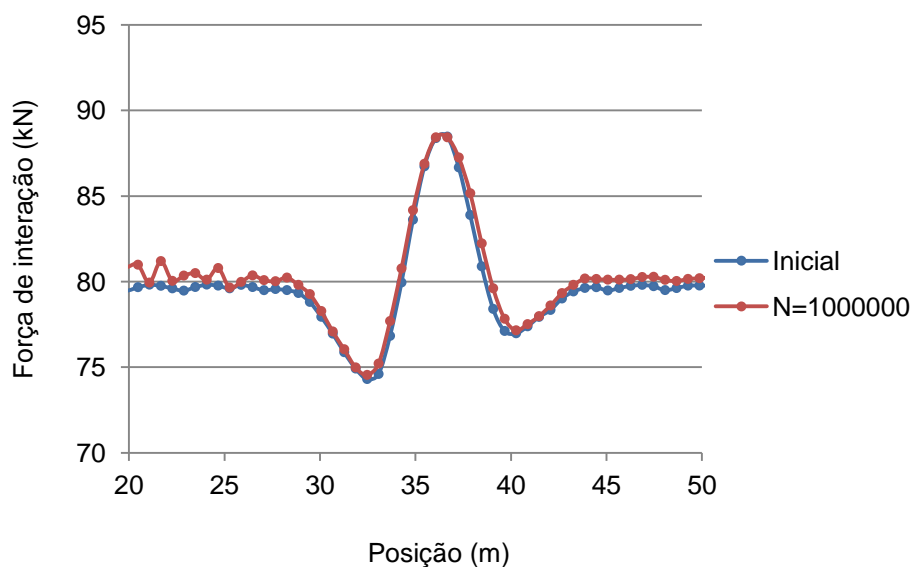


Fig. 5.15 – Evolução da força de interação travessa-balastro para diferentes ciclos de carregamento

Na Fig. 5.16, apresenta-se os valores máximos da força de interação travessa-balastro para o caso base e para a via com defeito pontual, em função do número de ciclos de carga.

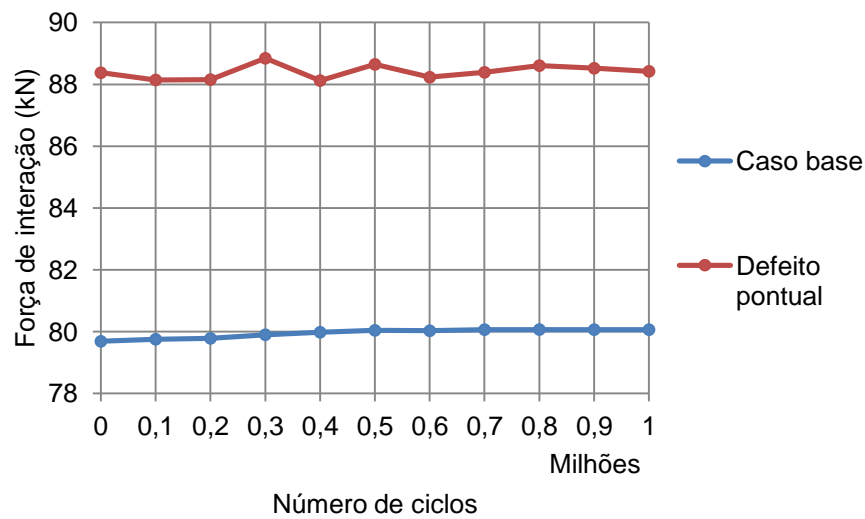


Fig. 5.16 – Evolução da força de interação travessa-balastro em função do número de ciclos de carga

Analisando os resultados, verifica-se que a força de interação travessa-balastro sofre uma variação na zona de influência do defeito pontual. Ao longo do número de ciclos de carga, verifica-se que a força de interação travessa-balastro é aproximadamente constante, sendo superior para a via com defeito pontual.

A Fig. 5.17 representa a posição vertical da roda ao circular ao longo da via para cada ciclo de carga.

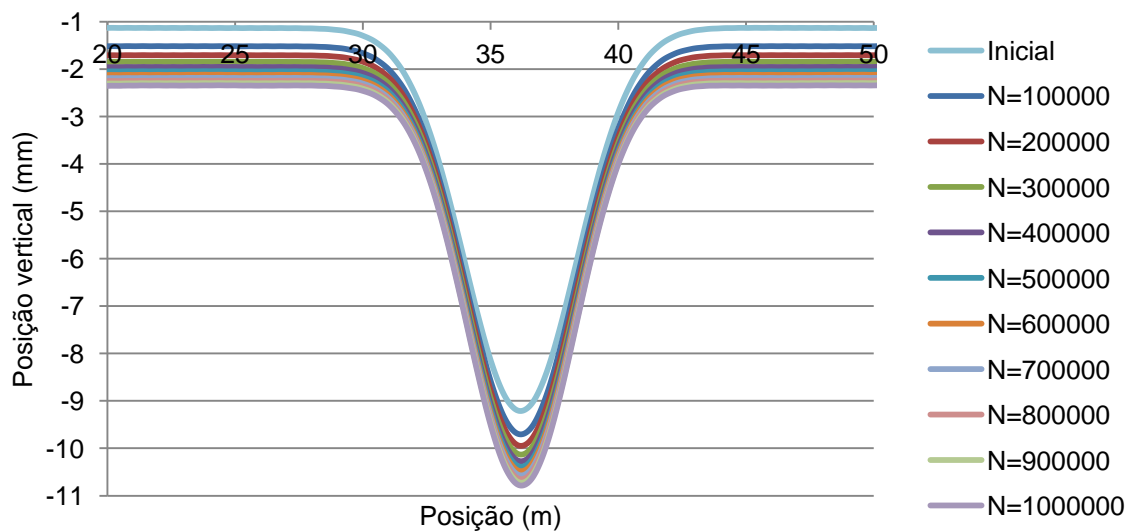


Fig. 5.17 – Posição vertical da roda ao longo da via em função do número de ciclos de carga

A Fig. 5.18 ilustra a evolução do deslocamento vertical da via para o caso base e para a via com defeito pontual, em função do número de ciclos de carga.

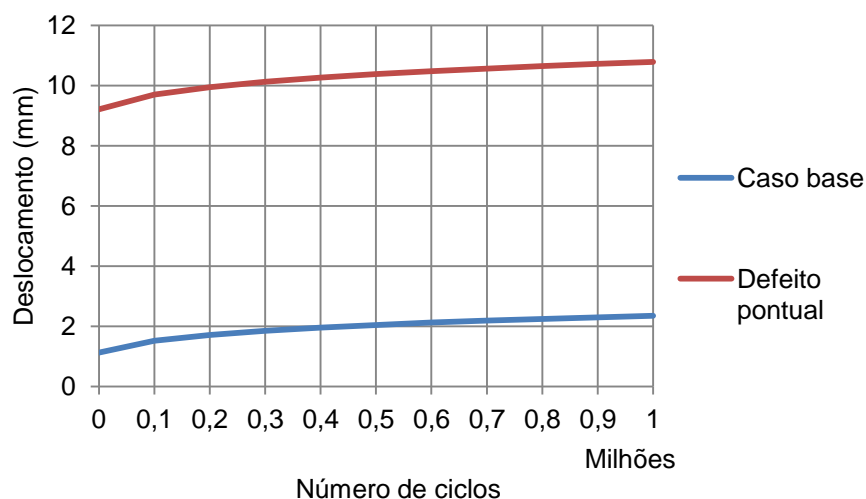


Fig. 5.18 – Evolução do deslocamento vertical da via em função do número de ciclos de carga

Analisando os resultados, verifica-se que o deslocamento vertical máximo da via é de cerca de 10,8 mm, correspondendo a 8 mm do defeito e a 2,8 mm do deslocamento da via.

Na Fig. 5.19, apresenta-se o registo temporal da aceleração vertical de uma travessa, na fase inicial e ao fim de 1 milhão de ciclos de carga.

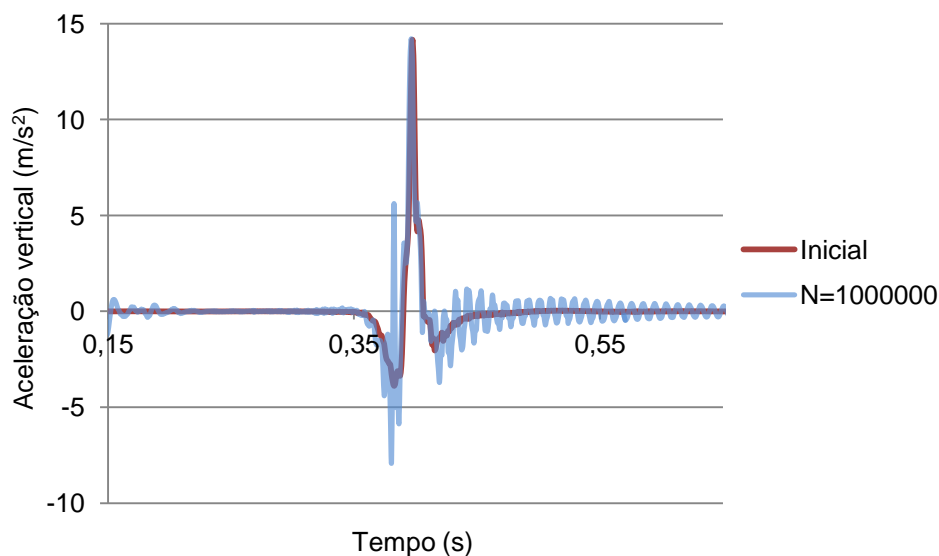


Fig. 5.19 – Registo temporal da aceleração vertical de uma travessa para diferentes ciclos de carregamento

Na Fig. 5.20, apresenta-se a evolução da aceleração vertical de uma travessa para o “caso base” e para a via com defeito pontual, em função do número de ciclos de carga.

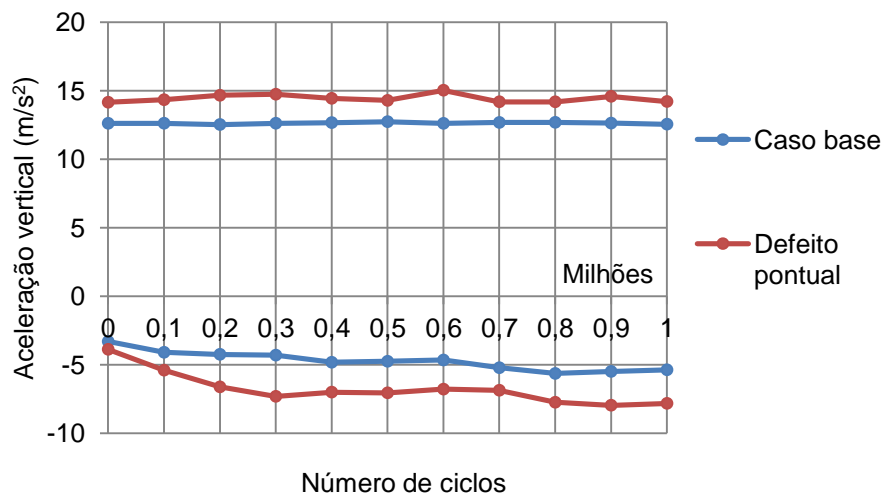


Fig. 5.20 – Evolução da aceleração vertical de uma travessa em função do número de ciclos de carga

Na análise dos resultados, verifica-se que a evolução da aceleração vertical das travessas é ligeiramente superior para a via com defeito pontual, sendo a sua evolução em função do número de ciclos praticamente constante.

### 5.3. CONCLUSÕES

A análise aos resultados do estudo apresentado neste capítulo permite retirar algumas conclusões acerca da influência de um defeito pontual na via férrea balastrada no comportamento dinâmico da via a curto e longo prazo.

A análise dinâmica a curto prazo recaiu sobre o estudo da força de interação roda-carril, do deslocamento vertical da roda e da via (sobre uma travessa) e das tensões verticais no balastro, sub-balastro e fundação (sobre uma travessa).

Relativamente a esta secção, conclui-se que:

- a presença do defeito pontual da via provoca alteração da força de interação roda carril na zona de influência do mesmo;
- a diferença entre a deformação em via perfeita e com defeito pontual (1,1 mm e 1,2 mm, respetivamente), deverá estar relacionado com o aumento da força de interação roda-carril devido à existência do defeito pontual;
- a tensão vertical é superior nas camadas de elementos finitos para a via com defeito pontual, comparativamente com a via perfeita, sendo esse aumento reduzido.

A análise a longo prazo teve como principal objetivo estudar a influência de um defeito pontual na evolução da deformação permanente da via e no seu comportamento dinâmico.

Relativamente a esta secção, conclui-se que:

- a tensão de desvio sofre uma variação na zona de influência do defeito pontual da via. A evolução da tensão de desvio em função do número de ciclos de carga é praticamente constante, sendo superior para a via com defeito pontual, comparativamente com o caso base;

- a deformação permanente da camada de balastro é superior na via com defeito comparativamente com o caso base, sendo que se verifica um aumento de cerca de 30% na zona da via onde ocorre o defeito pontual;
- a evolução do assentamento permanente da camada de balastro é superior na via com defeito pontual. Ao fim de 1 milhão de ciclos, o assentamento permanente é de 1,28 mm e de 1,65 mm, respetivamente, no caso base e na via com defeito pontual;
- o contacto travessa-balastro se mantém ao longo dos ciclos de carga;
- a força de interação travessa-balastro mantém-se aproximadamente constante com o aumento do número de ciclos de carga, sendo superior para a via com defeito pontual;
- a evolução da aceleração vertical das travessas é ligeiramente superior para a via com defeito pontual, sendo a sua evolução em função do número de ciclos praticamente constante.

# 6

## **CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTO PARA INVESTIGAÇÃO FUTURA**

### **6.1. CONCLUSÕES**

Relembrando os principais objetivos desta dissertação, estes foram: conhecer o estado de arte atual sobre modelos de assentamento permanente das camadas granulares de vias férreas balastradas; compreender a modelação da via, do comboio e do contacto roda-carril para o cálculo dinâmico do sistema via-veículo; avaliar numericamente a degradação de uma via balastrada, considerando no modelo numérico a deformação permanente dos materiais dada por uma lei que dependa do número de ciclos de carga e do estado de tensão a que os materiais estão sujeitos. A lei de deformação permanente da camada de balastro adotada neste estudo consiste na lei proposta pela ORE (1970). Com o estudo numérico desenvolvido pretendia-se estudar a influência dos parâmetros da lei de deformação no assentamento permanente.

No segundo capítulo, foram descritos os elementos constituintes da via férrea balastrada e é feita uma breve referência a modelos numéricos usados na modelação da via férrea balastrada e de defeitos pontuais da via. Tendo em vista a consideração da evolução da deformação permanente da via nas simulações numéricas realizadas efetua-se uma revisão de diferentes leis de deformação da camada de balastro existentes na bibliografia.

No terceiro capítulo, descreveu-se a modelação da via férrea balastrada, a modelação do veículo e da interação veículo-via, e a modelação do comportamento a longo prazo, tendo sido o principal objetivo a apresentação da modelação para a avaliação do comportamento da via balastrada feita no capítulo 4.

No quarto capítulo foi estudado o comportamento da via férrea balastrada perfeita, tendo sido a análise dividida em três fases:

- 1) comportamento estático da via, relativamente a deslocamentos verticais do carril e tensões nas camadas da via;
- 2) comportamento dinâmico a curto prazo da via perfeita, relativamente a força de interação roda-carril, deslocamento vertical da via e tensão vertical nas camadas da via;
- 3) influência da velocidade de circulação, da porosidade da camada de balastro e do período inicial de estabilização da camada de balastro no comportamento a longo prazo da via, considerando o



modelo de deformação permanente da camada de balastro proposto pela ORE (1970). Deste modo, verificou-se que:

- A velocidade de circulação do veículo não tem influência na evolução, em função do número de ciclos de carga da tensão de desvio, da deformação permanente, e do assentamento da camada de balastro, nem no deslocamento vertical da via e da força de interação roda-carril. A força de interação travessa-balastro e a aceleração vertical das travessas diminuem ligeiramente com a diminuição da velocidade;
- A porosidade da camada de balastro não tem influência na evolução, em função do número de ciclos de carga da tensão de desvio da camada de balastro, da força de interação travessa-balastro, da força de interação roda-carril e da aceleração vertical das travessas. Tem, no entanto, influência na evolução em função do número de ciclos de carga da deformação permanente da camada de balastro e consequentemente no assentamento permanente desta camada. O deslocamento vertical da via também é influenciado pela porosidade da camada de balastro;
- O período inicial de estabilização da camada de balastro não tem influência na evolução, em função do número de ciclos de carga da tensão de desvio da camada de balastro, da força de interação travessa-balastro, da força de interação roda-carril e da aceleração vertical das travessas. Este parâmetro tem no entanto influência na evolução em função do número de ciclos de carga da deformação permanente da camada de balastro e consequentemente no assentamento permanente desta camada. O deslocamento vertical da via também é influenciado pelo período inicial de estabilização da camada de balastro.

No quinto capítulo foi estudado o comportamento da via férrea balastrada com defeito pontual, tendo sido a análise dividida em duas fases:

- 1) comportamento dinâmico a curto prazo da via com defeito pontual, relativamente a força de interação roda-carril, deslocamento vertical da via e tensão vertical nas camadas da via;
- 2) comportamento dinâmico a longo prazo da via perfeita. Nesta segunda análise, verificou-se que:
  - O defeito pontual na via tem influência na evolução, em função do número de ciclos de carga da tensão de desvio da camada de balastro, da deformação permanente, e do assentamento da camada de balastro, da força de interação travessa-balastro. Tem uma pequena influência na evolução em função do número de ciclos de carga da aceleração vertical das travessas.

## **6.2. PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTOS PARA INVESTIGAÇÃO FUTURA**

Apresentam-se agora algumas sugestões para desenvolvimentos futuros.

Deste modo, sugere-se:

- 1) A realização de análises numéricas semelhantes às apresentadas nesta tese, considerando-se:
  - outro(s) modelo(s) de assentamento permanente da camada de balastro para além do modelo proposto pela ORE (1970), de modo a poder comparar-se metodologias para o comportamento da via férrea a longo prazo;
  - outros tipos de defeitos: outras formas e amplitudes de defeitos pontuais e distribuídos da via;
  - o assentamento permanente da camada de sub-balastro.

- 2) O estudo da influência da estabilização da camada de balastro através geossintéticos ou com reforço da camada de balastro recorrendo a polímeros na evolução da degradação de vias férreas balastradas;
- 3) A monitorização a longo prazo da evolução da degradação de uma secção de via férrea com comparação das medições experimentais com resultados numéricos.



## BIBLIOGRAFIA

- Alves Ribeiro, C. . 2012. *Transições aterro-estrutura em linhas ferroviárias de alta velocidade análise experimental e numérica*. Porto: FEUP.
- Alves Ribeiro, C., R. Calçada e R. Delgado. 2008. *Dynamic effects in transition zones of high speed railway lines*. in 15th Nordic Railway Seminar. Hooks Herrgards, Sweden.
- ERRI - D 214/RP 9. 1999a. *Rail bridges for speeds > 200 km/h. Annex E: Data for train types considered in studies, Final Report*. European Rail Research Institute. Utrecht, Netherlands.
- Esveld, C. 2001. *Modern Railway Track. Second Edition*.
- ETI. 2008. Decisão da Comissão de 20 de Dezembro de 2007 relativa à especificação técnica interoperabilidade para o subsistema "infra-estrutura" do sistema ferroviário transeuropeu de alta velocidade. editado por Jornal Oficial da União Europeia L 77/1 de 19 Março 2008 (PT).
- Faria. 1988. *Análise numérica de barragens abóbada sujeitas à acção sísmica*. Porto: [s. n.].
- FIB. 2006. "Precast Concrete Railway Track System." *FIB* no. Bulletin 37.
- Fortunato, E. 2005. *Renovação de plataformas ferroviárias estudos relativos à capacidade de carga*. Porto: [s.n.].
- Guérin, N. 1996. *Approche experimentale et numerique du comportement du ballast des voies ferrees*.
- Guimarães, A. 2009. *Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos*. Rio de Janeiro.
- Indraratna, B. e S. Nimbalkar. 2013. "Stress-Strain Degradation Response of Railway Ballast Stabilized with Geosynthetics " *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* no. 139:684-700.
- Indraratna, B., M.A. Shahin e W. Salim. 2007. "Stabilisation of granular media and formation soil using geosynthetics with special reference to railway engennering." *Journal of Ground Improvement* no. 11:27-44.
- Ionescu, D. 2004. "Evaluation of the engineering behaviour of railway ballast." *University of Wollongong*.
- Kennedy, J., P.K. Woodward, G. Medero e M. Bainimahd. 2013. "Reducing railway track settlement using three-dimensional polyurethane polymer reinforcement of the ballast." *Construction and Building Materials* no. 44:615-625.
- Lichtberger, B. 2005. *Track Compendium. Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics*.

- ORE. 1970. *Deformation properties of ballast. Laboratory and track tests (Text and appendices)*. Office of Research and Experiments of the International Union of Railway. Utrecht.
- Paixão, A. e E. Fortunato. 2009. *Novas soluções de superestrutura de via para a alta velocidade ferroviária comparação com a via balastrada tradicional*. Informações Científicas e Técnicas vias de comunicação INCVC. Lisboa: LNEC.
- Selig, E. T. e J. M. Waters. 1994. "Track geotechnology and substructure management." *Thomas Telford*.
- Shi, Xiaoyi. 2009. *Prediction of permanent deformation in railway track*. Nottingham.
- UIC518. 2005. "Essais et Homologation de Véhicules Ferroviaires du Point de Vue du Comportement Dynamique - Sécurité - Fatigue de la voie - Qualité de marche." *UIC*.
- UIC719Rb. 2008. "Earthworks and Track Bed for Railway Lines." *UIC*.
- Vale, C. 2010. *Influência da qualidade dos sistemas ferroviários no comportamento dinâmico e no planeamento da manutenção preventiva de vias de alta velocidade*. Porto: [s. n.].
- Vale, C. e R. Calçada. "A Dynamic Vehicle-Track Interaction Model for Predicting the Track Degradation Process." *Journal of Infrastructure Systems*
- Vale, C., N. Ribeiro, R. Calçada e R. Delgado. 2011. "Dynamics of a precast system for high-speed railway tracks." *3° ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*.
- White, W., I. Lee e S. Valliappan. 1977. "Unified Boundary for Finite Dynamic Models." *Journal of the Engineering Mechanics Division* no. 103:5:949-964.